ANTONIO TURIEL

Petrocalipsis

Crisis energética global y cómo (no) la vamos a solucionar

ALFABETŌ

Antonio Turiel

PETROCALIPSIS

Crisis energética global y cómo (no) la vamos a solucionar

Primera edición en esta colección:
septiembre de 2020
© Antonio Turiel, 2020
© de la presente edición: Alfabeto Editorial, 2020
Alfabeto Editorial S.L.
C/ Téllez, 22 Local C
28007 - Madrid
Tel. +34 910 687 252
www.editorialalfabeto.com
ISBN: 978-84-17951-11-5
Ilustración de portada: Alba Ibarz
Diseño de colección y de cubierta: Ariadna Oliver
Diseño de interiores y fotocomposición: Grafime
Reservados todos los derechos. Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos. Si necesita fotocopiar o reproducir algún fragmento de esta obra, diríjase al editor o a CEDRO (**www.cedro.org**).

En honor a mi pasado, Agustín y Carmen.
En reconocimiento de mi presente, Montse.
Por la esperanza de mi futuro, Alba y David.

ÍNDICE

1. *Prólogo*

2. 1. Por qué no sabemos cómo dejar el petróleo
3. 2. Por qué no podremos seguir utilizando el petróleo
4. 3. Por qué no nos salvará la fractura hidráulica
5. 4. Por qué no llegaremos lejos con los petróleos extrapesados
6. 5. Por qué no obtendremos mucho petróleo ni del océano profundo ni del Ártico
7. 6. Por qué no sirven los biocombustibles
8. 7. Por qué no podemos pasarnos al gas natural
9. 8. Por qué no será el carbón quien resuelva el problema
10. 9. Por qué no encontraremos la solución en la energía nuclear
11. 10. Por qué no crecerá más la energía hidroeléctrica
12. 11. Por qué no todo se puede alimentar con energía eólica
13. 12. Por qué no instalaremos millones de paneles solares
14. 13. Por qué no podremos mantenernos solo con energías renovables
15. 14. Por qué no funcionan el ahorro y la eficiencia
16. 15. Por qué no existe un motor de agua
17. 16. Por qué no hay energías libres
18. 17. Por qué no vamos a tener un coche eléctrico
19. 18. Por qué no es posible ignorar el daño que causamos al medioambiente
20. 19. Por qué no volveremos a tener el clima de otro tiempo
21. 20. Por qué no saldremos nunca de esta crisis
22. 21. Por qué la crisis de la covid-19 ha acelerado nuestro descenso
23. 22. Qué es lo que realmente hace falta cambiar
24. 23. Por qué sí

25. *Bibliografía*

PRÓLOGO*

Los últimos años del siglo XX vieron la explosión del *pensamiento positivo*. «Piensa en positivo», decían, y de esa manera todos tus problemas se solucionarán. Se podían exponer los problemas, sí, pero siempre se tenía que ofrecer al final una solución, un soplo de optimismo. Si el lector es de los que piensan que todos los problemas tienen solución, este *no* es su libro, así que puede dejar de leerlo ya. Gracias, de todos modos, por haberlo abierto.

Porque este es, sin duda, el libro del «no»; tanto es así que, de hecho, *no* es la palabra que más se repite en él. Y no aparece tanto para molestar al lector ni porque yo sea un cenizo o un amargado. En absoluto. La repito para dejar claro que muchas de las cosas que estamos haciendo ahora mismo *no* representan la solución a nuestros problemas ni, previsiblemente, lo harán nunca. La repito para intentar desmontar un entramado de ideas preconcebidas que hace ya tiempo que se ha demostrado que son falsas, pero que —a pesar de ello— sigue configurando los debates de hoy en día, al igual que lo hacía diez, veinte, treinta o cuarenta años atrás. Y me intereso por estas cuestiones porque son capitales para entender qué es lo que nos está pasando.

Jamás saldremos de esta crisis. No, al menos, dentro del esquema económico y social del que nos hemos dotado. No crea el lector que se trata de una afirmación gratuita. En realidad, hace mucho tiempo que se sabe que iba a pasar esto; lo que ocurre es que no queríamos cambiar y por eso no lo hemos hecho. Pero ahora ya no se puede esperar más: hemos llegado a ese día en que las consecuencias de nuestros actos se han vuelto concluyentes.

Pero, veamos, ¿quién soy yo para decir que no vamos a salir *nunca* de esta crisis? Bueno, soy un científico. Pero no un economista, sino un físico y matemático. ¿Y qué puede saber un físico de economía? En realidad, no demasiado: más bien algunas cuestiones básicas de las que me considero autodidacta. Y, entonces, ¿cómo puedo afirmar tan rotundamente que no saldremos jamás de esta crisis? Porque cuanto impide la salida de esta crisis constituyen razones físicas, a saber: es físicamente imposible volver a

crecer desde una perspectiva económica, y no solo eso, sino que incluso estamos condenados a decrecer. Dicho de otro modo: lo establecen las leyes de la física. No sé dónde acabaremos exactamente, pero sí que sé con certeza dónde **no** terminaremos.

Un economista con formación clásica rechazará la noción de que el mundo real pueda imponer límites físicos al mundo económico; la idea le parecerá tosca, grosera, ingenua (por ejemplo, Paul Krugman decía algo así en un artículo titulado «Errores y emisiones»). Lamentablemente, un estudio detallado de la realidad económica del mundo y de su evolución muestra que la economía se asienta sobre una realidad *física* y que, por tanto, se halla sometida a los límites del propio planeta. Que no es un ente inmaterial, sino que posee una «entidad física», por ello está sometida, como todos nosotros, a los dictados de la mecánica y de la termodinámica. Por fortuna, muchas escuelas económicas de nuevo cuño, tales como la economía ecológica o la economía del estado estacionario (escuela económica que postula un sistema sin crecimiento), hace tiempo que incorporan esta realidad para llevar a cabo un nuevo diseño de la economía en la que esta sea un subconjunto del mundo natural, como siempre lo fue. Desafortunadamente, son escuelas minoritarias a las que todavía no se les hace mucho caso.

No es tan difícil desmontar la gran falacia del pensamiento positivo y de que todo problema tenga solución. Le voy a plantear al paciente lector un sencillo problema de matemáticas que suelo usar cuando doy charlas en institutos para explicar que no todos los problemas tienen solución: trate de encontrar dos números pares cuya suma sea igual a cinco. ¿Se le ocurre la solución? En efecto, ese problema no tiene solución: la suma de dos pares ha de ser par, y cinco es impar. ¿Se dan cuenta? Hay problemas sin solución. De los problemas que no tienen solución decimos que están mal planteados.

Por supuesto que ese ejemplo aritmético del problema sin solución resulta una banalidad desconectada del mundo real, pensará tal vez el lector. Planteemos, pues, otro problema: trate esta vez de hallar un sistema económico que sea capaz de crecer infinitamente en un planeta finito. No estamos hablando ahora de entes abstractos, sino de un sistema económico con «entidad física», como todos los que ha conocido hasta la fecha nuestro planeta, como lo es el actual y deben serlo —ya lo mostraremos en el

capítulo correspondiente— todos los sistemas económicos de este mundo. ¿Tiene ya la solución? No, no la tiene porque el problema está mal planteado, su enunciado implica su propia imposibilidad. Como tampoco la tienen los economistas que ahora mismo están asesorando al actual Gobierno de España o al de otros países en materia económica. Y, sin embargo, nuestro sistema económico necesita el crecimiento para funcionar, ya es sabido: si el PIB no crece un 2 % anual, el paro no bajará ni los bancos darán crédito, como tampoco invertirán las empresas. Vamos de un ciclo recesivo al siguiente, con pequeños períodos intercalados de calma, en una crisis que comenzó en 2007 y que no va a acabar nunca. Porque, cada vez que empecemos a remontar, chocaremos contra un muro invisible, un techo de cristal que nadie ve, pero que, llegado el momento, nos asestará un golpe en la cabeza que nos hará recular. Para empeorarlo, ese techo de cristal está descendiendo a su vez, de modo que, aun cuando queramos subir, en realidad cada vez estamos más abajo.

El mencionado techo de cristal, en verdad, está hecho de energía, lo que equivale a decir que está compuesto principalmente de petróleo. Veamos: sin energía no hay actividad económica, sin energía no se mueven los camiones ni las excavadoras o los tractores, por no hablar de los coches. No hay plásticos ni fertilizantes ni depuración de aguas ni servicios sanitarios. Sin energía nada funciona. Pero resulta que ese techo está compuesto también de otras cosas: de contaminación y de problemas financieros y sociales. Yo no soy un experto en todas esas capas del techo que se nos está cayendo encima, pero conozco bastante bien el componente energético y medianamente bien el ambiental. Lo que yo le propongo en estas páginas, en suma, es que venga conmigo y deje que le explique por qué resulta imposible, a estas alturas, seguir como estábamos simplemente analizando esas dos capas: la energética y la ambiental. Con el objetivo de que entienda por fin por qué desconozco hacia dónde vamos exactamente, pero sé, en cambio, con exactitud adónde no vamos.

Cuando acabemos este viaje, el lector entenderá como yo que nuestro verdadero problema consiste en que el problema no se halla bien planteado: pretendemos hacer lo imposible y, lógicamente, nos estrellamos una y otra vez. Pero nos hemos dicho tantas mentiras, hemos creado tantas expectativas infundadas, que el primer paso para replantear de nuevo la situación (los objetivos alcanzables por nuestra sociedad) supone demostrar,

de una vez por todas, que el problema está mal planteado. Por eso era necesario este libro, en el que se nos dice por fin a las claras: ¡no, no y mil veces no! a tantos cuentos de hadas con los que hemos adormecido nuestras conciencias. Usemos la luz de la razón y despejemos las sombras, y, una vez que sepamos adónde no debemos dirigirnos, comencemos a iluminar el camino para saber cuál es el mejor destino posible de entre los lugares a los que nos gustaría ir.

Yo no me hago muchas ilusiones con este libro. No es esta la primera vez que alguien del mundo académico intenta alertar del disparate que, sin embargo, es la única directriz válida para nuestros gobiernos y que corre el riesgo de arrastrarnos al abismo (como evidencia, la lacra del paro y el subempleo). Sé que algunos adeptos a la ideología del crecimiento, que son muchos y tienen acceso a los grandes medios de comunicación, tomarán tal o cual dato de este libro, lo retorcerán, lo sacarán de contexto y dirán algo así como que digo cosas que en realidad no aparecen en este libro. Se ha hecho antes y se volverá a hacer ahora. La principal diferencia entre el presente y el pasado es que ahora mismo se nos están acumulando tantos problemas y de tal gravedad, que perder el tiempo en discusiones espurias puede ser fatal para la continuidad de nuestro orden social.

Mientras iba escribiendo el libro, he ido muchas veces hacia delante y hacia atrás, reescribiendo trozos e insertando discusiones nuevas en lugares por los que ya había pasado. He hecho un gran esfuerzo por darle a este libro no solo un formato coherente, sino por intentar que, al mismo tiempo, sea algo digerible. Pero lo más importante ha sido hacer comprensibles las razones por las que la mayoría de las cosas que se están proponiendo en el debate público *no* se puede hacer, y eso sin perderme en la enorme cantidad de tecnicismos que obviamente presenta un tema tan complejo como este, que abarca ramas de la geología, la física y la ingeniería. Así pues, he evitado tanto como he podido referirme a cantidades absolutas y he preferido poner cada fuente en relación con las demás, de modo que se vea con mayor claridad la importancia relativa de cada una. También, cuando presento las dificultades y las limitaciones que posee cada solución tecnológica, he preferido evitar las explicaciones técnicamente más farragosas en favor del empleo de términos sencillos y comprensibles para abordar los problemas fundamentales. Por tanto, que nadie busque en este libro una gran profusión de datos o discusiones minuciosas sobre procesos

fisicoquímicos o procedimientos de ingeniería o incluso estimaciones de reservas probadas o probables. Para poder discutir todas las cuestiones a las que se aluden en estas páginas de manera exhaustiva haría falta escribir una auténtica enciclopedia y no menos de una veintena de autores, y el resultado sería una obra adecuada solo para su consulta por especialistas. No es lo que se pretende aquí y ahora, sino, muy al contrario, enviar un mensaje a la sociedad y explicarle con argumentos sencillos pero bien fundados que estamos perdiendo completamente la perspectiva al concederle una orientación del todo equivocada a nuestros problemas, que estamos errando el camino mientras nos perdemos y no avanzamos en la dirección debida. En suma, hacer entender *por qué no* va a pasar nada de lo que se dice y por qué, si no lo entendemos, podemos acabar en un desastre completo. Un desastre cuyo primer síntoma es la misma escasez del petróleo; de ahí el nombre de *petrocalipsis*.

Que haya desplegado un gran esfuerzo por hacer mis argumentos más divulgativos no quiere decir que mis aseveraciones estén exentas de rigor; justamente al contrario, al simplificar los argumentos, he tenido que ser más cuidadoso y preciso para evitar caer en afirmaciones erróneas, lo cual ha supuesto que me haya centrado en aquellos aspectos que verdaderamente determinan la imposibilidad, en ese *por qué no* que se repite machaconamente capítulo tras capítulo. A pesar de toda la rebaja de tecnicismos y del esfuerzo por acercar las cuestiones más candentes al lector general, seguramente para alguno de mis lectores el grado de detalle que va a encontrarse en estas páginas sea aún excesivo. A estos lectores les pido su benevolencia: piensen en todas las tablas, gráficos y ecuaciones que he omitido en favor del argumento. Por otro lado, algunos lectores con mayor formación pueden encontrar discutibles los datos clave que ofrezco porque contradicen cosas que conocen. A estos les pido cierta dosis de paciencia y que no desdeñen al primer vistazo alguna posible contradicción que encuentren: piensen que he revisado cada dato y afirmación, y que quizá la diferencia entre lo que yo digo y lo que ellos sepan guarde relación con ciertas palabras clave (como la diferencia entre la energía primaria y la energía final). Aparte de eso, por supuesto algunos datos presentan cierto margen de incertidumbre, a veces considerable. En caso de que mis datos sean opinables y revisables, leámoslos, contrastémoslos y revisémoslos. Ciertamente, yo no estoy en posesión de la verdad y puedo equivocarme en

alguna medida: discutamos el asunto entonces. Abramos de una vez un debate que lleva demasiado tiempo aparcado, demasiado tiempo ignorado. Pero eso sí: hagámoslo ya, porque el tiempo para reaccionar se nos está acabando.

1POR QUÉ NO SABEMOS CÓMO DEJAR EL PETRÓLEO

Es conocido por todos que el empleo de petróleo perjudica el medioambiente. No en vano, nuestro consumo de petróleo libera grandes cantidades de dióxido de carbono que contribuyen al cambio climático, junto con otros gases contaminantes que provocan enfermedades respiratorias. Además, la extracción de petróleo puede contaminar el agua y la tierra de las zonas que lo albergan. Pero no podemos dejar de usarlo. De hecho, no sabemos cómo dejar de usarlo. ¿A qué es debido? ¿Qué tiene el petróleo que lo haga tan apetecible e irremplazable?

El petróleo es un combustible fósil. Más en concreto, es lo que técnicamente se conoce como un hidrocarburo líquido de origen fósil. Eso quiere decir que constituye una mezcla de moléculas en las que abundan los átomos de carbono y de hidrógeno, formadas por la descomposición y la transformación de materia orgánica enterrada profundamente durante millones de años. El petróleo, como el resto de los combustibles, contiene mucha energía en poco volumen: es una sustancia energéticamente densa. Y eso es lo que lo vuelve tan interesante. Y tan necesario.

En efecto: un litro de petróleo contiene aproximadamente treinta millones de julios de energía. Al profano le parece complicado decir si eso es mucho o poco, porque no resulta fácil intuir lo que supone un julio (unidad de energía en el sistema internacional). Hay una comparación útil que permite expresar la energía en términos mucho más comprensibles: expresar la cantidad de energía en horas de trabajo físico de un hombre. En término medio, un adulto en buena forma física puede desarrollar una potencia muscular (energía producida por cada unidad de tiempo) de unos cien vatios durante un período más o menos prolongado (de unas ocho horas al día). Como el vatio equivale al consumo de un julio por segundo, los cien vatios de potencia muscular del trabajador promedio representan que produce una energía de cien julios por segundo o, si quieren, de seis mil julios por minuto o de trescientos sesenta mil julios por hora. Teniendo eso en cuenta, los treinta millones de julios de energía contenidos en un litro de petróleo

equivaldrían al trabajo físico humano desplegado por nuestro trabajador durante ochenta y tres intensas horas de esfuerzo. Eso serían casi tres días y medio sin parar o bien, si lo expresamos en agotadoras jornadas de ocho horas diarias, poco más que diez días de trabajo. Eso por lo que se refiere al petróleo sin refinar; si hablamos de gasolina o de diésel, su contenido energético es hasta un 30 % mayor.

Gracias a esa densidad energética sin igual, es posible mover máquinas muy pesadas con una autonomía de muchas horas o de centenares de kilómetros usando un depósito de combustible increíblemente pequeño. Piensen por un momento en su coche: con solo un depósito de cuarenta o cincuenta litros, ¿cuántos cientos de kilómetros son capaces de recorrer? Algunos coches, con una conducción apropiada, pueden llegar a recorrer hasta mil kilómetros a una velocidad realmente sorprendente, por encima de los cien kilómetros por hora. Un simple litro de gasolina es capaz de permitir que un coche avance entre quince y veinte kilómetros. ¿Cuánto tiempo creen que les llevaría empujar ese mismo coche, con su tonelada larga de peso, usando solo sus manos, hasta que recorriera esos quince o veinte kilómetros? A pesar de que el motor de combustión de los coches modernos solo aproveche un 25 % de toda la energía del combustible, aun así, y gracias a la enorme densidad energética del petróleo, podemos hacer cosas que a nuestros bisabuelos les parecerían increíbles.

El petróleo, hoy en día, viene a ser la savia de la economía mundial. *Petróleo* quiere decir «transporte»: aun cuando no todo el petróleo se use en el transporte, la mayoría del transporte se basa en el petróleo. Comenzando por el transporte personal y cotidiano (coches y motos), siguiendo por el de mercancías (furgonetas, camiones y barcos) y acabando por los medios de transporte rápidos de larga distancia (aviones), el petróleo permite mantener en marcha el transporte mundial. Gracias a la abundancia del petróleo barato que ha caracterizado las últimas décadas, el sistema de transporte mundial se ha expandido hasta alcanzar el gigantismo actual, lo que ha hecho posible el sueño de la globalización. Hoy en día, se fabrica en masa en China para que los bienes producidos sean transportados en contenedores a bordo de grandes cargueros que cruzan los mares del mundo. En la actualidad, cada familia occidental suele tener al menos un coche, y eso ha conseguido que la fabricación de automóviles sea la principal manufactura en los países desarrollados y uno de los grandes

generadores de empleo y de actividad económica. Y no solo eso: el petróleo también se usa para mantener en marcha maquinaria fundamental, desde las grúas y excavadoras que usamos para construir, mantener y reparar nuestras infraestructuras hasta los tractores y cosechadoras que garantizan la producción masiva de alimentos (y eso sin hablar de los usos químicos del petróleo: plásticos, reactivos, alquitranes, parafinas…).

Hemos creado un enorme monstruo que se alimenta de petróleo. Un gigante que mantiene en marcha la economía y nos proporciona empleos, seguridad, alimentos… La tercera parte de la energía que se consume hoy en día en el mundo proviene del petróleo, lo cual lo convierte en la fuente de energía más importante de todas las que usamos. Queremos prescindir del petróleo porque sabemos que no es bueno para el medioambiente, pero no podemos dejar de usarlo de forma repentina.

A principios de la década de 1970 descubrimos hasta qué punto dependíamos del petróleo cuando los países árabes, como represalia por nuestro apoyo a Israel, sometieron a Occidente a un embargo que duró meses, pero cuyas consecuencias económicas se dejaron sentir hasta mediados de la década de 1980. Fue una crisis económica muy seria en un mundo que aún no conocía la globalización y que consumía la mitad del petróleo que consume hoy en día.

En 2008 el precio del barril de petróleo se disparó, y en julio de ese año llegó a rozar los ciento cincuenta dólares. Dos meses más tarde, las autoridades federales de los Estados Unidos decidieron no rescatar Lehman Brothers, que con su quiebra desencadenó la crisis económica más profunda de las últimas décadas hasta la llegada de la covid-19. Y, aunque el desmán de las hipotecas basura fuera la leña apilada que necesitó la crisis para arder durante años, los altos precios del petróleo vinieron a ser la chispa que desencadenó el incendio, porque a esos precios de nuestro más vital combustible la mayoría de las actividades económicas simplemente no eran viables.

Necesitamos dejar el petróleo, pero, como muestran los ejemplos de 1973 y de 2008, no podemos prescindir de él de golpe.

Lo sensato sería ir adoptando un plan para el abandono progresivo del petróleo, pero, como el petróleo es tan versátil, tan fácil de transportar, tan energético…, cuesta mucho prescindir de ese líquido con propiedades casi mágicas. Y, como de momento tampoco existen alternativas energéticas que

sean, cuando menos, tan útiles y baratas, en la práctica no se están llevando a cabo verdaderos cambios. Porque no es rentable, no es económico y porque, en el fondo, no creemos que sea tan necesario.

Sin embargo, en noviembre de 2018 comenzó a sonar, con fuerza, una alarma. Se ciñe un nuevo peligro en el horizonte, uno del cual los investigadores en recursos naturales llevan años alertando. Una amenaza que los representantes políticos y los grandes actores económicos, pese a conocerla desde hace tiempo, han preferido ignorar tanto como han podido porque plantea un problema urgente para el cual no disponemos de una solución sencilla. Es el que supone la llegada del llamado *peak oil*, o «cénit de producción del petróleo», al que dedicaremos el siguiente capítulo. Un problema tan grave que nos va a obligar a prescindir del petróleo aunque nosotros no queramos. En realidad, el petróleo nos va a abandonar mucho antes de que nosotros renunciemos a él.

2POR QUÉ NO PODREMOS SEGUIR UTILIZANDO EL PETRÓLEO

Necesitamos el petróleo porque todo depende de él. Tenemos que prescindir de él, pero tenemos que hacerlo paulatinamente, so pena de sufrir graves consecuencias en el funcionamiento de todo nuestro sistema económico y social. Pero ¿qué pasaría si de repente comenzáramos a disponer de menos petróleo cada año? ¿Qué pasaría si, al margen de lo que a nosotros nos convenga más, simplemente comenzáramos a no contar con ese petróleo al que le hemos confiado nuestra estabilidad?

El *peak oil* supone la llegada al punto de máxima extracción posible de petróleo en el mundo. Decimos *petróleo*, pero usamos esta palabra en un sentido muy extenso: nos referimos a todas las sustancias líquidas más o menos asimilables al petróleo de toda la vida (el cual, en esta nueva nomenclatura, se denomina *petróleo crudo convencional*, mientras que los otros líquidos más o menos similares se denominan *petróleos no convencionales*). Es un hecho conocido desde hace décadas que, a pesar de que las reservas de petróleo puedan ser inmensas, la velocidad a la que extraemos (o producimos) petróleo se halla limitada por diversos factores físicos y no puede sobrepasar cierto valor. Peor aún: después de haber alcanzado su máximo, la velocidad de extracción de petróleo irá reduciéndose paulatinamente sin remedio.

La razón de este descenso en la producción es fácil de entender si uno piensa en cómo se encuentra el petróleo en el subsuelo. El petróleo se halla generalmente ocupando las oquedades e intersticios de una roca de tipo poroso (es decir, una roca llena de agujeros, similar a un queso gruyer, pero con agujeros más grandes y más pequeños). Se ha de pensar en esa roca porosa, también llamada *reservorio*, como en una esponja completamente empapada de petróleo en su interior. Cuando se comienza a explotar un yacimiento de petróleo, se realiza una perforación desde la superficie hasta llegar a la roca reservorio. Como el petróleo es un líquido y, a la profundidad a la que se encuentra, está sometido a una gran presión (la del

peso de toda la roca que tiene encima), tan pronto como se le abre una vía de escape, el petróleo comienza a fluir con fuerza a la superficie. El petróleo va fluyendo libremente, pero, a medida que vamos extrayéndolo, la roca reservorio va compactándose: sin el petróleo de su interior, y sometida a presiones increíbles, la roca se comprime y cimenta. Eso es malo para el flujo del petróleo, porque los canales interiores de la roca por los que iba circulando se van primero estrangulando y finalmente cerrando a medida que la roca colapsa. Para evitar que descienda el flujo de petróleo, las compañías petroleras utilizan múltiples técnicas (denominadas *de recuperación mejorada*) que permiten mantener valores elevados de extracción, al menos durante un tiempo. Generalmente se abren pozos auxiliares por los que se inyecta agua o gas a presión, lo cual permite mantener la presión interior de la roca y evitar que colapse y, al mismo tiempo, empujar el petróleo hacia los pozos de extracción. A veces se hacen perforaciones en horizontal, en ocasiones se revienta la roca para favorecer que el petróleo siga fluyendo y otras veces simplemente se perfora un nuevo pozo de extracción a una cierta distancia del anterior para intentar absorber el petróleo albergado en una zona distinta de la misma formación rocosa. El caso es que, al final, lo que va quedando en la roca es el *petróleo disperso*, el que está diseminado aquí y allá en forma de gotitas, de pequeñas bolsas a lo sumo. La mayoría del petróleo contenido en la roca nunca llegará a ver la luz, simplemente porque se halla tan diseminado que intentar extraerlo costaría una cantidad de energía, y de dinero, tan descomunal que nunca merecerá la pena sacarlo: pensemos que, de promedio, solo se puede extraer el 35 % de todo el petróleo que alberga una formación de petróleo convencional.

Esta gran diseminación del petróleo en un reservorio que posee una geometría muy complicada de huecos interconectados por tortuosos canalillos no solo explica por qué no se puede extraer todo el petróleo contenido en la roca, sino también por qué la producción alcanza un máximo y, después, declina. Así pues, al principio extraemos todo el petróleo fácilmente interconectado y perforamos por donde nos dé más rendimiento. A medida que el yacimiento envejece y se vuelve muy explotado, se necesita cada vez un esfuerzo mayor para sacar menos petróleo. Llegados a este punto, el empresario echa sus cuentas: puede gastar, como mucho, cierta cantidad de dinero por cada litro de petróleo que

extrae. A veces, la tecnología permite mejorar un poco la capacidad de extracción; otras, incluso, la subida del precio de venta del petróleo le permite gastar un poco más, pero nada de eso cambia el hecho de que siempre se acabe llegando a un punto en el que se acepta que la producción de un pozo empieza a descender, simplemente porque no vale la pena gastar mucho más en intentar extraer unas gotas de petróleo.

Es un lugar común entre las empresas que se dedican al negocio del petróleo enfatizar lo enormes que son las reservas mundiales de petróleo para, así, dar a entender que no puede haber problemas con el suministro de petróleo. Lo que no deja de ser curioso, pues si alguien entiende de veras la cuestión de la pérdida de rendimiento de los pozos son precisamente estas empresas. Y es que no importa cuán grandes sean esas reservas. De hecho, si contamos el volumen total de las reservas de todo tipo de hidrocarburos que, más o menos, podemos considerar asimilables al petróleo, nos encontraremos con que, al ritmo del consumo de hoy en día —unos noventa y tres millones de barriles diarios—, necesitaríamos varios siglos para terminarlas. El problema es que todos esos hidrocarburos no van a salir a la misma velocidad con la que hoy los consumimos, sino a la que permitan las limitaciones geológicas y físicas. Por así decir, la naturaleza nos impone un corralito en nuestra cuenta de petróleo, y no vamos a poder extraer lo que queramos cada mes, sino lo que esta nos deje. Aquí reside el verdadero problema.

A pesar de que los expertos lleven décadas explicando el problema de la extracción limitada de petróleo (primero fue Marion King Hubbert en la década de 1950; después, Colin Campbell y Jean Laherrère a finales del mismo siglo y, más tarde, muchos otros, de los cuales los más conocidos en España son el catedrático Mariano Marzo y el ingeniero Pedro Prieto), suele haber una gran confusión sobre lo que esto significa realmente. Le hablas a la gente de «agotamiento del petróleo» y la mayoría cree que el problema consiste en que el día menos pensado no va a salir ni una gota más: que pasaremos, de golpe, de la abundancia a la carestía más feroz. Esta visión equivocada proviene del hecho de pensar que la extracción de petróleo equivale a abrir un grifo de un depósito: el líquido fluye hasta que se acaba. Ya hemos explicado, sin embargo, que la disposición del petróleo en el subsuelo es mucho más complicada y que se sigue una curva de producción: con su ascenso, culminación y ulterior descenso. Por tanto, el

problema que se plantea con el agotamiento del petróleo no es que su producción se detenga de golpe, sino que, a partir de cierto momento, empiece a disminuir, aunque ese descenso se produzca a lo largo de muchas décadas. El problema del *peak oil* es semejante, pues, al de una persona a la que le vayan reduciendo el sueldo a lo largo de los años: puede que, al principio, no le moleste mucho, pero, a medida que vaya pasando el tiempo y su sueldo sea cada vez más bajo, a esta persona le va a ir costando mayor esfuerzo llegar a fin de mes, y eso que en ningún caso deja de percibir su salario. Esa es exactamente la situación que tiene lugar en la extracción limitada de petróleo, por la que se da un descenso inevitable e irreversible —aunque progresivo— de nuestro «sueldo energético».

En 2010, la Agencia Internacional de la Energía reconoció por primera vez que la producción de *petróleo crudo convencional* (el petróleo de toda la vida) había tocado fondo entre 2005 y 2006. En esos años llegó a su máximo histórico, de casi setenta millones de barriles diarios y, desde entonces, ha ido cayendo lentamente: a finales de 2018, la producción de petróleo crudo convencional se situaba en los 67 millones de barriles diarios. Afortunadamente para nosotros, no todos los líquidos del petróleo que se consumen hoy en día son petróleo crudo convencional: están los otros petróleos, los *no convencionales*, que, al término de 2018, representaban 26 millones de barriles diarios más, hasta completar la cifra de 93 millones de barriles diarios de media de 2018. Por tanto, ahora mismo la única cosa que puede hacer crecer la producción de todos los líquidos del petróleo son esos petróleos no convencionales. No solo eso, sino que, además, tienen que compensar la caída del petróleo crudo convencional, un descenso que de momento es moderado, pero que se va a ir acelerando en los próximos años. ¿Pueden los petróleos no convencionales permitirnos continuar con nuestro consumo creciente de todos los líquidos del petróleo?

En los próximos capítulos veremos que no, que los petróleos no convencionales en absoluto van a permitirnos seguir aumentando la producción de petróleo. Y lo que es peor todavía: que quizá nunca los debíamos de haber intentado producir, porque nos van a llevar a una caída más desastrosa si cabe. Pero, antes de seguir, enumeremos cuáles son los principales *petróleos no convencionales*:

1. Los líquidos del gas natural.
2. Los biocombustibles.

3. Los petróleos en aguas ultraprofundas.
4. Los petróleos extrapesados provenientes de las arenas bituminosas de Canadá y de la Franja del Orinoco de Venezuela.
5. El petróleo ligero de roca compacta proveniente de la fractura hidráulica (*fracking*).

A cada una de estas categorías —excepto a la primera— le dedicaré un capítulo, porque estoy seguro de que en los próximos años va a dedicarse mucha atención en los medios a cada una de estas fuentes, siempre prometiendo un milagro que no se va a producir. En cuanto a la primera de estas categorías, los líquidos del gas natural, no hace falta extenderse mucho porque su producción está completamente ligada a la del gas natural (son un subproducto de su extracción), al que dedicaré todo un capítulo. Además, los líquidos del gas natural están constituidos casi totalmente —en un 90 % de su composición— por butano y propano, los cuales, aunque puedan usarse como sustitutos (limitados) de la gasolina, están lejos de ser realmente algo asimilable al petróleo, entre otras cosas porque, contrariamente a lo que podría indicar su nomenclatura —*líquidos del gas natural*—, estamos hablando de sustancias que son gases a temperatura ambiente y bajo la presión atmosférica (entran en el residuo líquido de la extracción de gas natural solo debido a la enorme presión a la que se extraen). Los líquidos del gas natural, en realidad, prácticamente solo tienen importancia en las refinerías, más en concreto, en las líneas de producción del propileno y del butileno, que son las sustancias utilizadas para la fabricación de plásticos. Es decir, que prácticamente los líquidos del gas natural solo sustituyen al petróleo en la producción del plástico, pero tienen un uso limitado en su sustitución como combustible, y no deberían mezclarse en esta discusión.

3POR QUÉ NO NOS SALVARÁ LA FRACTURA HIDRÁULICA

En 1970 los Estados Unidos llegaron a su nivel máximo de producción de petróleo crudo convencional. Casi quince años antes, un prominente geólogo, Marion King Hubbert, había anticipado esta efeméride. En su día, todo el mundo se burló de la predicción de Hubbert, pero, cuando se cumplió su pronóstico, este adquirió una gran notoriedad, al menos durante unos años. La predicción de Hubbert se basaba en un modelo muy sencillo en el que se tenía en cuenta tanto la probabilidad de encontrar nuevos yacimientos de petróleo como la eficiencia con la cual el petróleo es extraído. Uno de los ingredientes del modelo de Hubbert consiste en afirmar que continuamente se están descubriendo y poniendo en marcha nuevos pozos de petróleo y, a pesar de ello, la producción de petróleo puede acabar decayendo. Por tanto, no es posible evitar la caída de la producción de petróleo por el simple hecho de que sean explotados nuevos yacimientos: eso es lo normal y el modelo ya lo incluye. En consecuencia, para poder escapar de las predicciones de Hubbert resulta necesario introducir otros recursos, los cuales a la larga seguirán su propia curva de producción, que —con un poco de suerte— será más lenta que la del petróleo convencional.

Se podría decir que desde comienzos del siglo XXIla industria del petróleo se ha dedicado fundamentalmente a eso: a buscar nuevos recursos, diferentes de los del petróleo crudo convencional, a fin de escapar de la maldición de Hubbert. Se trata, por tanto, de identificar fuentes de hidrocarburos que, con la extracción y el tratamiento adecuados, puedan usarse después como sustitutos más o menos aceptables del petróleo. Los siguientes capítulos los dedicaré a explicar por qué cada uno de los sustitutos que se han ido introduciendo durante los últimos años no va a poder reemplazar al petróleo. Y comenzaré por el petróleo procedente de la fractura hidráulica (*fracking*), pues se trata de la categoría que más ha crecido en los últimos años y que ha servido para alimentar muchas falsas esperanzas.

Como comentábamos antes, hacia 2005 la producción de petróleo crudo convencional comenzó el lento declive en el que está inmersa desde

entonces. En 2008, el precio del barril de petróleo se disparó hasta niveles nunca vistos con anterioridad, y en julio alcanzó casi los ciento cincuenta dólares, por lo que el mundo entró en una profunda recesión económica. Mucho se habló entonces acerca del esquema financiero de las hipotecas basura y muy poco del papel que había desempeñado el encarecimiento de la energía durante esos meses, a pesar de que —sin duda— los elevados precios del petróleo tuvieron una gran relevancia en el desencadenamiento de la crisis. El hecho es que los analistas del sector sabían y comprendían de sobra que había que hacer algo de forma urgente para paliar la llegada al *peak oil* del crudo convencional, y por ese motivo era preciso conseguir cuanto antes una nueva fuente de hidrocarburos líquidos. Cualquiera. Al precio que fuera.

A finales de 2009 y principios de 2010, cuando el precio del petróleo comenzaba a remontar con fuerza otra vez después del fuerte parón económico de 2008, en los Estados Unidos se comenzaron a explotar nuevos tipos de hidrocarburos líquidos. Se trataba de extraer un hidrocarburo semejante al petróleo convencional, pero que, en vez de ocupar las oquedades y recovecos de una roca porosa —semejante a una esponja—, se encontraba atrapado dentro de una roca compacta, sin cavidades conectadas y en la cual el petróleo no podía fluir a partir de la perforación inicial. Para poder extraer esos hidrocarburos, se recurrió en primer lugar a la técnica de la perforación horizontal (se excava un agujero inicial en vertical y después se consigue hacer girar la cabeza perforadora noventa grados, hasta situarla prácticamente en un plano paralelo a la superficie, a fin de excavar túneles en varias direcciones). Con esas perforaciones horizontales, que generalmente se extienden un kilómetro o dos en múltiples direcciones (por lo común, se trazan entre ocho y dieciséis galerías horizontales partiendo del mismo pozo vertical), se consigue acceder a un mayor volumen de la roca con el objetivo de recuperar esas gotas de petróleo dispersas por todo su seno. Sin embargo, como la roca sigue siendo demasiado compacta y el petróleo no fluye con facilidad, se recurre a una segunda técnica: la de la fractura hidráulica (en inglés, *hydrofracking*, una expresión que luego se abreviaría como *fracking*). La fractura hidráulica consiste en inyectar agua y arena a presión a impulsos repentinos que son prácticamente como explosiones con el objetivo de fracturar la roca compacta y así volverla porosa a la fuerza.

Con esto se accede a una cantidad mucho mayor del petróleo almacenado en la roca, pero —aun así— tiende a quedarse pegado a la piedra y fluye poco, de modo que se precisa inyectar otras sustancias que favorezcan su drenaje para que el petróleo sea menos pegajoso y pueda por fin fluir hasta la superficie.

Como es fácil suponer, la técnica de explotación del *fracking* (que comprende la perforación horizontal múltiple y la fractura hidráulica) resulta extremadamente costosa, y por ese motivo no se ha usado de forma masiva hasta que nuestra desesperación nos ha obligado a ello. A veces, se dice que el *fracking* estadounidense es fruto de la innovación tecnológica, pero eso no es cierto: la perforación horizontal hace décadas que se usa, principalmente en los pozos que se perforan en alta mar (porque allí lo que cuesta más es hacer el primer pozo vertical), y, en cuanto a la fractura hidráulica en sí, también es conocida desde hace décadas y, de hecho, ya se había usado en ciertas formaciones en las que los pliegues del terreno dificultaban la salida del petróleo convencional. Lo que nunca se había hecho antes es aplicar estas técnicas a rocas tan poco propicias y con tan escaso rendimiento como a las que se les está aplicando masivamente en los Estados Unidos desde 2009. Añádase a esto que los pozos de *fracking* obtienen el 80 % de su rendimiento en los dos primeros años y que cinco años después su producción resulta completamente despreciable, por lo que se suelen abandonar antes de cumplirse ese plazo, y se comprenderá por qué no se han hecho oleoductos que transporten la producción, pues los pozos duran tan poco tiempo que no sale a cuenta. Todo se traslada en camión, tanto el petróleo que se extrae como el agua y la arena que se inyectan para hacer la fractura hidráulica, las sustancias que se usan para favorecer el flujo de hidrocarburos y las aguas contaminadas que afloran. Todo va en camiones, que en las zonas más productivas forman hileras interminables que circulan veinticuatro horas al día. Y como de promedio se necesitan doscientos pozos de *fracking* para producir lo mismo que con un pozo convencional, se tienen que perforar miles de pozos, sin pausa, para mantener en marcha semejante industria.

Hacia 2010 los Estados Unidos producían solamente cinco millones de barriles diarios, poco menos de la mitad de la producción que habían logrado en 1971 (algo más de diez millones de barriles diarios). Tras ese declive sostenido durante casi cuarenta años, los Estados Unidos han

conseguido catapultar su producción total de hidrocarburos líquidos gracias al petróleo de fractura hidráulica, y en 2018 consiguieron por fin llegar a los once millones de barriles diarios, lo que superaba el récord de 1971. La cosa no se detuvo allí y a mediados de 2019 se produjeron en los Estados Unidos doce millones de barriles diarios, y se convirtieron así en el primer productor del mundo, posición que habían perdido hacía más de cuarenta años. Debido a este innegable éxito de la industria extractiva norteamericana, desde numerosos medios —ya en 2012— se saludó con efusión la llegada del *fracking* y se vaticinó que la técnica se extendería rápidamente a muchos otros países con formaciones rocosas semejantes a las de los Estados Unidos, unas rocas compactas con un contenido relativamente alto de hidrocarburos líquidos. El mundo, nos decían, caminaba hacia una nueva era de abundancia petrolera, los Estados Unidos conseguirían en pocos años la independencia energética y el poder de la OPEP se desvanecería.

Siete años más tarde, se ha visto a las claras que el *fracking* supone una actividad propensa a la exageración y al exceso de *marketing*, cuya explotación lleva con seguridad a la ruina económica, aunque a diferente velocidad en función de si hablamos de los Estados Unidos o de cualquier otro país.

En Argentina, en 2011, tanto los poderes políticos como la población se abonaron con excesivo entusiasmo a la idea de que la explotación del petróleo y del gas de lutitas mediante esta técnica iba a generar pingües beneficios, y que en el caso particular del petróleo el país podría remontar la caída continua de producción que se venía dando desde 2001. Apostándolo todo a esas promesas de energía casi ilimitada, el Gobierno argentino expropió entonces la gran compañía argentina de hidrocarburos, YPF, propiedad entonces de Repsol, puesto que consideraban que la compañía española no era lo suficientemente diligente para explotar ese gran tesoro nacional. Ocho años después, la producción de petróleo argentino ya no cubre el consumo nacional y, por supuesto, no queda petróleo neto que exportar, mientras que el país se ha visto abocado a un nuevo rescate del Fondo Monetario Internacional.

Aparte de Argentina, el único otro país en donde se ha hecho una explotación a escala apreciable del petróleo de *fracking* es en los Estados Unidos, como comentábamos, con gran éxito aparente. Sin embargo, ya en

2014 el Departamento de Energía de los Estados Unidos alertaba de que las 127 mayores compañías de petróleo y gas de todo el mundo (contando las públicas y privadas, nacionales y multinacionales) habían estado perdiendo más de ciento diez mil millones de dólares por año de 2012 a 2014.

El estudio del Departamento de Energía de los Estados Unidos resulta especialmente preocupante, pues justo de 2011 a 2014 el precio medio del barril del petróleo fue el más caro de toda la historia, incluso teniendo en cuenta la inflación. Es decir, con precios del petróleo sostenidamente por encima de los ciento diez dólares por barril, estas compañías estaban perdiendo unas cantidades astronómicas de dinero. ¿Cuánto dinero perderían durante los años siguientes, en los que el precio medio se ha situado en torno a los sesenta dólares por barril, casi la mitad? La causa fundamental de estas pérdidas fueron los gigantescos gastos en exploración y desarrollo, que se multiplicaron casi por tres de 2000 a 2014, y justamente el *fracking* fue uno de los responsables de ese enorme incremento del gasto.

A partir de 2014, y con la caída del precio del petróleo por el menor crecimiento de la demanda, sobre todo en China, las operaciones de las compañías petroleras emprenden un curso diferente según si estas se radican en los Estados Unidos o en el resto del mundo. Si bien en todo el mundo los recortes en la búsqueda y el desarrollo de nuevos pozos de petróleo son continuos, llegó a reducirse la inversión total a la mitad entre 2014 y 2018. Sin embargo, en los Estados Unidos la inversión sigue creciendo, de modo que en 2018 se dio la paradójica situación de que Norteamérica (Estados Unidos, Canadá y México) estaba invirtiendo en su exploración y desarrollo más que el resto del mundo, a pesar de producir menos del 20 % del petróleo mundial.

La culpa de ese frenesí inversor norteamericano es, por supuesto, del *fracking*. Las empresas del sector se han endeudado como si no hubiera un mañana, en una lógica por entero perversa en la que los créditos de hoy sirven para pagar los vencimientos de deuda de ayer, un esquema piramidal de deuda que siempre acaba funestamente. Mientras que la mayoría de la prensa económica ve en la fractura hidráulica una demostración de que el ingenio humano no tiene límites, se multiplican los avisos procedentes de fondos de inversión y de grandes bancos de que el *fracking* podría llevar a muchos inversores a la ruina. El hecho es que, en su acelerada huida hacia delante, solo abriendo nuevos pozos con esta técnica —cada vez menos

productivos porque los mejores se han explotado antes— se pueden pagar los vencimientos de los intereses, aunque en ningún momento se esté devolviendo el capital inicial. Los inversionistas aguantan, convencidos de que la continua mejora tecnológica abaratará los costes y de que en algún momento el *fracking* producirá pingües beneficios. La realidad es, sin embargo, que las mejoras tecnológicas son pequeñas y no compensan la pérdida de calidad de los lugares que se explotan una vez que los mejores sitios ya han sido utilizados. Para agravarlo aún más, la deuda anual solo del sector del *fracking*estadounidense se incrementa en varias decenas de miles de millones de dólares por año.

¿Podrá el petróleo de la fractura hidráulica aguantar el tipo? ¿Podrá la producción de petróleo de *fracking*continuar subiendo? Según las previsiones más pesimistas, esta técnica de extracción ha tocado fondo en 2019; según las más optimistas, no llegará a su culmen hasta 2025. En ningún caso se espera que la producción de petróleo total de los Estados Unidos (contando los petróleos no convencionales como el de *fracking* y los convencionales de toda la vida) supere jamás los quince millones de barriles diarios, de modo que quedará, por tanto, lejos de los veinte millones de barriles diarios de consumo estadounidense; en suma, el sueño de la independencia energética no se va a cumplir nunca. Además, en cualquiera de los dos escenarios de máxima extracción de petróleo de *fracking* (*peak fracking oil*), una vez que la producción de petróleo ligero de roca compacta empiece a decaer, los inversionistas comprenderán que no se va a poder devolver nunca el capital inicial y, entonces, se desatará el pánico. Es decir, el *fracking* no solo no va a resolver el problema, sino que en realidad es una bomba de relojería que va a causar mucho daño cuando estalle. Y en un plazo de tiempo bastante breve.

4POR QUÉ NO LLEGAREMOS LEJOS CON LOS PETRÓLEOS EXTRAPESADOS

A finales del siglo XX se empezaron a percibir los primeros síntomas de que la producción de petróleo estaba cerca de tocar fondo. En aquel entonces, todo el petróleo que se producía era del mismo tipo y no hacía falta distinguir entre petróleo convencional y no convencional: el petróleo era simplemente ese hidrocarburo líquido viscoso y maloliente que se extraía en los clásicos pozos. Pero cada año se estaban descubriendo menos yacimientos de petróleo nuevos, hasta el punto de que ya no se cubría con esos hallazgos lo que se gastaba por año. Los geólogos que trabajaban en las petroleras comprendían perfectamente ya, a finales del pasado siglo, que la progresiva reducción de los hallazgos de nuevos yacimientos presagiaba una deceleración, primero, y una caída, después, de la producción de petróleo.

En 1998, los geólogos Colin Campbell y Jean Laherrère, con décadas de servicio en grandes petroleras multinacionales, publicaron su premonitorio artículo «El fin del petróleo barato» en la revista *Scientific American*, en el que avisaban acerca del futuro inevitable que auguraban para la producción de petróleo convencional. Quedaban todavía décadas de seguir produciendo petróleo, sí, pero cada vez se extraería en menor cantidad anual y sería más caro. Los datos de producción de los siguientes años y la subida progresiva de los costes de extracción confirmaban la validez del estudio de Campbell y Laherrère, así que hacía falta actuar. No se podía confiar en seguir haciendo lo de siempre; era preciso buscar nuevas fuentes de energía.

Naturalmente, esas fuentes de energía alternativas podían ser otras materias primas no renovables, como el gas natural, el carbón o el uranio, o también energías renovables. Pero la industria del petróleo no podía reconvertirse tan fácilmente de la noche a la mañana; necesitaban algo que se pareciese al petróleo de siempre. Además, la mayoría de las máquinas autónomas y automóviles que funcionan en el mundo utilizan productos derivados del petróleo, tan solo porque el petróleo es un líquido con una enorme densidad de energía, y eso es doblemente útil: que sea líquido hace

que repostar resulte muy rápido, cuestión de pocos minutos, y que contenga tanta energía permite que las máquinas y los vehículos funcionen sin necesidad de repostar cada dos por tres. Pero no solo es conveniente para las petroleras encontrar un sustituto adecuado: los combustibles derivados del petróleo son, en verdad, la sangre que circula por las venas de nuestra civilización. Así que, tanto por el interés de las petroleras como por el de la sociedad en general, fue preciso que se encontraran nuevas fuentes de hidrocarburos líquidos de alta densidad energética. Y los encontraron. Más o menos.

Desde hace muchas décadas se conocen las grandes reservas mundiales que existen de los *petróleos extrapesados*, cuyos mayores depósitos se encuentran en Canadá y en Venezuela. Estos petróleos extrapesados se denominan así porque son muy densos y viscosos, hasta el extremo de que no se pueden considerar propiamente líquidos: su aspecto es, más bien, el de la brea o el alquitrán. Resultan unos ungüentos grasos, densos y pegajosos, más útiles para calafatear barcas o para asfaltar carreteras que para quemar. El nombre técnico de este tipo de sustancias es *bitumen*, y por eso en el caso de los depósitos de Canadá, donde el petróleo extrapesado se encuentra mezclado con arena, se las conoce como *arenas bituminosas*. En Venezuela también se presenta mezclado con el sustrato arenoso de la selva del río Orinoco, en una zona de más difícil acceso que en Canadá, aunque las reservas venezolanas son enormes.

La extracción del petróleo extrapesado despega hacia 2000, en un momento en que se empieza a intuir que el petróleo crudo convencional no subirá más, pero es a partir de 2005, cuando el petróleo crudo convencional toca fondo, que empieza a concederse más importancia a los petróleos extrapesados (recuerden que la fractura hidráulica no llegaría hasta cinco años más tarde, hacia 2010). En apariencia, suponía una gran oportunidad para que Canadá y Venezuela se convirtieran en los grandes suministradores mundiales de petróleo; Canadá, además, está muy interconectado con los Estados Unidos y sus gobiernos son aliados desde hace mucho tiempo, con lo que la situación parecía extremadamente ventajosa. Sin embargo, demasiado pronto se vio que los petróleos extrapesados presentaban demasiadas limitaciones al no permitir alcanzar un alto nivel de producción, y creaban, además, graves problemas ambientales.

La explotación de los petróleos extrapesados plantea enormes retos ya desde su misma extracción. Dado que no fluyen de ninguna manera, se tiene que comenzar por reblandecerlos y arrastrarlos con vapor de agua a mucha presión. Esto implica, en primer lugar, un gran consumo de agua y, en segundo, un gran consumo de energía para calentar el agua hasta convertirla en vapor e inyectarla en el subsuelo para ir extrayendo el bitumen. Obviamente, se arrastra no solo bitumen, sino también muchas otras cosas, arena principalmente, que precisan ser filtradas y separadas. Pero ahí no acaba la cosa. La sustancia extraída, el bitumen, forma una mezcla de hidrocarburos de cadenas muy largas y muy insaturado (es decir, con pocos átomos de hidrógeno), mientras que los hidrocarburos líquidos que solemos usar como combustibles (gasolina, diésel, fuelóleo, queroseno…) presentan cadenas mucho más cortas y repletas de hidrógeno. Así que hay que mejorar el bitumen para poder transformarlo en combustible idóneo para coches, camiones, tractores, excavadoras, aviones, barcos… Para lo cual se han seguido diversas estrategias en las dos regiones que son las máximas productoras mundiales: Athabasca, en Canadá, y la Franja del Orinoco, en Venezuela.

En Canadá, debido a la proximidad de las explotaciones de las arenas bituminosas a los grandes yacimientos de gas natural, se usó inicialmente ese gas para dos fines. En primer lugar, para calentar el agua y así obtener el vapor de agua necesario con que extraer el bitumen. Ese bitumen era, después, transportado en trenes hasta las mismas refinerías, donde el gas natural se volvía a usar para hacer la mejora final de la mezcla, el segundo fin de su empleo, insertando los átomos de hidrógeno en las cadenas insaturadas del bitumen y haciendo que el producto fuera ya algo más cercano al petróleo convencional, de modo que se pudiera continuar con la cadena de refinado estándar. El problema consistía en que, durante el proceso, se liberaban grandes cantidades de dióxido de carbono, el denostado gas de efecto invernadero CO_2. Las emisiones de gases de efecto invernadero en Canadá aumentaron de tal manera que se vio obligada a elegir entre renunciar a un pingüe negocio seguro o abandonar el Protocolo de Kioto. Por desgracia, escogió lo segundo, y fue el único firmante del Protocolo de Kioto en retirarse de él.

Pero, a medida que la producción de bitumen canadiense fue subiendo, pronto se vio que no habría suficiente gas natural para hacer la mejora en

ese mismo país, circunstancia agravada por la llegada de Canadá a su *peak gas* particular (o cénit de producción de gas natural). Hubo que buscar una estrategia alternativa, y esta fue la de mezclar el bitumen con petróleo más ligero proveniente de los Estados Unidos, de manera que ya pudiese ser transportado a través de los oleoductos y llevar la mezcla hasta refinerías estadounidenses especializadas en tratar este tipo de producto. Esa solución fue favorecida a partir de 2010 debido al espectacular incremento de la producción de petróleo ligero de roca compacta procedente del *fracking* estadounidense, así que de nuevo parecía que el círculo se volvía a cerrar de manera perfecta. Sin embargo, las limitaciones en la cantidad de gas natural y de agua disponible para la primera fase del proceso han impedido que la producción de petróleos extrapesados de Canadá sobrepasara los dos millones de barriles diarios (frente a los casi cien de todo tipo de petróleo que consume el mundo hoy en día).

La situación es más precaria en el caso de Venezuela. Si bien en la Franja del Orinoco el agua es abundante, el gas natural no lo es tanto como en Canadá y, además, la zona es de difícil acceso y escasa infraestructura. Venezuela optó desde el principio por mezclar sus petróleos extrapesados con el petróleo ligero que la propia Venezuela extraía de la bahía de Maracaibo, pero esto pronto planteó dos serios inconvenientes: por una parte, la mezcla (que allí denominan *orimulsión*) tenía menos valor y mayor coste productivo que el petróleo de alta calidad de Maracaibo, y eso hizo que, aunque Venezuela aumentara su producción total de petróleo, disminuyeran sus ingresos. Además, el petróleo de Maracaibo empezó a declinar a principios de 2000 (Venezuela llegó a su particular *peak oil* del petróleo crudo), con lo que pronto comenzó a faltar petróleo ligero para conseguir realizar la orimulsión y Venezuela empezó a importarlo de otros países, y no le servía un petróleo cualquiera, sino que tenía que ser de alta calidad y de algún país donante que quisiera hacer tratos con Venezuela. Así las cosas, Venezuela comenzó a importar petróleo de Argelia, que pagaba a un precio muy elevado, y eso redujo rápidamente el beneficio económico obtenido (de modo que, en buena medida, el problema de su sector petrolero ha sido el que ha arrastrado al país al marasmo en que se encuentra en la actualidad). La situación de Venezuela es claramente insostenible, con sus campos caribeños en declive y su suministrador principal de petróleo ligero, Argelia, amenazado, pues este país también ha

superado su pico de extracción, además de arrastrar no pocos problemas domésticos.

Durante la primera década de este siglo se exageró mucho la importancia de los petróleos extrapesados, ya que sus reservas equivalen a un par de siglos del consumo actual de petróleo. Sin embargo, por más bitumen que encontremos en el subsuelo, al final la producción mundial de petróleos extrapesados difícilmente superará nunca los cuatro millones de barriles diarios (poco más del 4% del total actual), y no por falta de reservas de bitumen, sino por escasez de los otros medios que se necesitan: agua, calor y una fuente de hidrocarburos ligeros extra con los que poder combinarlos. Además, la explotación de este recurso conlleva una destrucción medioambiental difícilmente comparable con la de otras fuentes energéticas: al problema del aumento de las emisiones de CO_2 se le añade la contaminación de las aguas superficiales y de los acuíferos con sustancias tremendamente tóxicas y cancerígenas (benceno, tolueno, dioxinas…), junto con la destrucción de los bosques y selvas que se asientan sobre los depósitos de petróleos extrapesados, una pérdida que tiene un doble efecto negativo, ya que se destruye un hábitat natural de gran valor para muchas especies y porque, al eliminar el suelo y remover la tierra, este queda descubierto y más propenso a la erosión. Asimismo, la inversión en los petróleos extrapesados es ruinosa desde un punto de vista medioambiental, pero también supone una ruina económica: el elevado coste energético hace que el rendimiento de este tipo de explotación no pueda ser nunca económicamente rentable, con independencia de cuál sea el coste del barril de petróleo. Si no, que se lo pregunten a Repsol, que compró a la canadiense Talisman con el dinero que le pagaron por la expropiación de YPF para venderla unos pocos años más tarde con unas pérdidas de más de mil ochocientos millones de dólares.

5POR QUÉ NO OBTENDREMOS MUCHO PETRÓLEO NI DEL OCÉANO PROFUNDO NI DEL ÁRTICO

Hubo un momento, hacia finales del siglo XX y comienzos del actual siglo XXI, en el que se pensó que el petróleo crudo convencional iba a tener continuación en las explotaciones de petróleo en alta mar. A fin de cuentas, parecía una proyección bastante lógica: a principios de la era moderna del petróleo, después de la Segunda Revolución Industrial, los yacimientos de petróleo que se explotaban se hallaban en tierra firme y eran muy someros; cuenta la leyenda que en aquellos días bastaba con disparar un tiro al suelo en aquellas ricas tierras de Texas o Pensilvania para que enseguida el petróleo comenzase a brotar con fuerza. Con el paso del tiempo, las técnicas de prospección y de explotación fueron mejorando y se empezaron a introducir pozos que extraían petróleo de decenas de metros, incluso algunos centenares, por debajo de la superficie, aunque hasta 1970 las principales regiones petrolíferas del mundo, Texas y Arabia Saudita, se basaran principalmente en el mismo petróleo somero de los primeros años. Pero llegó la crisis del petróleo con el embargo árabe de 1973 primero y la guerra Irak-Irán de 1978 después, y el mundo tuvo que buscar nuevas fuentes de petróleo. Y no solo se profundizó en tierra firme, sino que por primera vez se empezaron a explotar de forma masiva los yacimientos de petróleo en el mar, concretamente, en la denominada *plataforma continental* o zona sedimentaria de agua menos profunda que rodea los continentes. Y así empezó a ganar importancia el petróleo *offshore* o de yacimientos en el mar. De modo que, a medida que los yacimientos que se encuentran sobre la plataforma continental se iban agotando, lo lógico era pensar que el siguiente paso sería desplazarse a alta mar. Los hallazgos de los yacimientos presal en la costa de Brasil y de Angola, y su exitosa explotación (Brasil consiguió doblar sus reservas gracias a estos yacimientos), anticipaban un futuro brillante para este tipo de recurso.

De manera análoga, el avance del cambio climático ha dejado al descubierto —o poco cubiertas por el hielo— amplias zonas del océano Ártico. A diferencia del Polo Sur, el Polo Norte del planeta es un vasto

océano con una profundidad media de unos mil metros, recubierto por una capa de hielo marino cuyo grosor ha ido disminuyendo con el paso de los años, y en la actualidad es de un metro, o menos, en el 80 % de su cada vez más menguada extensión. Dado que ciertas teorías geológicas apuntan a que el fondo del Ártico podría albergar enormes depósitos de hidrocarburos, los países ribereños del Ártico se plantean lanzarse en pos de tan lucrativa recompensa, usando para ello las tecnologías que se están desarrollando para la explotación en aguas profundas.

Sin embargo, casi veinte años después de que se empezasen a alimentar las expectativas con el petróleo de alta mar, el caso es que los éxitos han sido moderados y las expectativas han quedado lejos de cumplirse. Y eso porque, aun cuando al profano (y a más de un economista) le pueda parecer que no existe mucha diferencia entre un yacimiento en la plataforma continental y otro en alta mar, lo cierto es que son física y geológicamente muy diferentes. Y en el Ártico, la situación se complica aún más si cabe debido a lo extremo del ambiente.

La plataforma continental es una zona del mar cercana a los continentes que se caracteriza porque su fondo marino presenta unas características geológicas diferentes de las del fondo en alta mar y por ser mucho menos profundo (de unos pocos metros a unos doscientos metros). La plataforma continental tiene una forma irregular que no es fácil de predecir simplemente mirando la línea de costa: en algunos sitios, la plataforma continental es muy estrecha, de unos pocos kilómetros (como pasa en algunas partes del litoral español), mientras que en otras partes la plataforma es enormemente ancha, de cientos de kilómetros (como, por ejemplo, sucede en la costa atlántica francesa). La plataforma continental se origina por el depósito en el fondo marino de los sedimentos que arrastran las aguas continentales, y por eso suele ser más ancha en la desembocadura de los grandes ríos, aunque —como es lógico— también influya en su formación la presencia de corrientes marinas más o menos intensas. Por su carácter sedimentario, los depósitos de petróleo que se encuentran en áreas de la plataforma continental suelen hallarse enterrados a menor profundidad dentro de la roca, ya que el petróleo se forma fundamentalmente por depósitos de algas que quedaron atrapados en el lecho marino millones de años atrás, algunos de los cuales se encuentran ahora en tierra firme, si bien otros continúan bajo el fondo del mar. Por tanto, los yacimientos de

petróleo que se encuentren en la plataforma continental son fáciles de explotar: la plataforma petrolífera puede hallarse directamente fijada al suelo marino, que podría estar solamente a unas pocas decenas de metros bajo el agua, y la cantidad de roca que perforar también resulta relativamente pequeña, de unos cuantos cientos de metros y, encima, se trata de una roca más lábil (porque es sedimentaria). Por ejemplo, el petróleo brent, de referencia en Europa, que empezó a explotarse a gran escala en la década de 1980, se extrae del mar del Norte, una zona del Atlántico poco profunda comprendida entre el Reino Unido y Dinamarca cuya profundidad media es de unos cien metros, aunque posea amplias zonas donde la profundidad no supera los treinta metros.

En contraste, la situación es muy diferente en alta mar. La profundidad media de los grandes océanos es de varios miles de metros (cuatro mil quinientos metros, en el caso del océano Atlántico) y el tipo de roca que se encuentra allí suele ser de origen magmático, basáltico, pues es creada en las dorsales submarinas (cadenas de volcanes submarinos que discurren de norte a sur por en medio de los grandes océanos y donde se origina la nueva corteza terrestre, que va empujando a los continentes y produce la conocida *deriva continental*). Durante mucho tiempo se pensó que era imposible que hubiera hidrocarburos líquidos en el mar profundo, dado el origen volcánico de la roca superficial y la hondura del mar en esas zonas. Se creía que cualquier estrato sedimentario que contuviera hidrocarburos y hubiera sido empujado a esas profundidades sufriría tales presiones y temperaturas que todo el hidrocarburo se disociaría y se convertiría en metano y que este, al ser un gas, acabaría escapándose por alguna grieta o bien, si encontraba oxígeno suficiente, sufriría un proceso de combustión y se transformaría en CO_2 y agua (y que ambos, en algún momento, se filtrarían a la superficie). Sin embargo, el descubrimiento de los yacimientos presal de Brasil hizo cambiar ligeramente semejante perspectiva.

Los yacimientos de presal son yacimientos de petróleo sedimentario convencionales que se han visto atrapados por una gruesa capa de sal sedimentada. Los estratos que contienen ese petróleo se hallan en un proceso de subducción (hundimiento) hacia capas muy profundas, pero se ubican a una profundidad en la que la temperatura y la presión todavía no han conseguido disociar por completo el petróleo en metano. Su

composición química es ligeramente diferente de la del petróleo menos profundo de la plataforma continental y de tierra firme, aunque se considere en general de buena calidad. Eso sí, como se encuentra a una gran presión y temperatura, su extracción debe contar con mayores medidas de seguridad para evitar deflagraciones, especialmente cuando se da con una bolsa de gas (la cual se halla en mayor cantidad que en otro tipo de yacimientos debido al proceso de disociación antes comentado).

Los procesos geológicos que dan lugar a la formación y almacenamiento geológico de este tipo de petróleo son muy peculiares (capa de sal gruesa, ventana de profundidad geológica adecuada) y por eso este tipo de yacimientos no es común. Los yacimientos de Brasil y Angola se encuentran preferentemente en la zona denominada *de talud continental*, que es el espacio de transición entre la plataforma continental y el mar profundo. Estos yacimientos se suelen ubicar bajo una lámina de agua de unos dos mil metros y bajo estratos de roca de unos tres mil metros de grosor; por tanto, se trata de extraer el petróleo que se halla unos cinco kilómetros por debajo del punto de extracción. Ya solo por eso podemos hacernos una idea de la complejidad y de las dificultades de la producción de petróleo en aguas profundas. Por ejemplo, debido a la profundidad a la que se encuentra el lecho marino, es imposible pensar en construir una plataforma petrolífera convencional fijada al fondo marino; por el contrario, este tipo de yacimientos se explotan usando plataformas petroleras flotantes con geoposicionamiento dinámico: es decir, la plataforma petrolera o barco de extracción flota libremente, de ahí que, para evitar doblar el tubo de perforación hasta partirlo, precise moverse continuamente a fin de asegurarse de que está siempre sobre el pozo. Así, el barco calcula una y otra vez su posición mediante GPS y se reposiciona a cada instante con sus motores omnidireccionales. Todo un prodigio de la técnica. Además, dadas las dificultades para abrir el primer pozo, generalmente a partir del pozo central se extienden una multitud de perforaciones horizontales (al igual que se hace con la técnica del *fracking*) en múltiples direcciones (hasta en dieciséis direcciones diferentes) y durante varios kilómetros; en ocasiones, también se recurre a la fractura hidráulica. Todo esto encarece de forma considerable las operaciones de extracción de petróleo en aguas profundas. Por eso la compañía nacional de Brasil, Petrobras, se ha asociado con diversas grandes multinacionales (entre ellas, Repsol) para poder explotar

estos yacimientos. Y también por eso las explotaciones de Angola no se encuentran tan desarrolladas. El petróleo de aguas profundas representa actualmente poco menos de tres millones de barriles diarios (alrededor del 3% de la producción mundial).

Aparte de lo peligroso de la explotación del petróleo en aguas profundas (debido a la alta presión del fluido, este se expande al ascender y mantiene una temperatura todavía muy alta, lo que produciría una explosión si entrase en contacto con el oxígeno del aire), este tipo de yacimientos muestra un comportamiento mucho peor que los de tierra firme: la producción comienza a decaer ya en los primeros años de vida y los ritmos de declive terminal superan el 8% y hasta el 9% anual (mientras que en tierra firme se sitúan entre el 5 y el 6% anual). En resumen, se trata de yacimientos caros de explotar, peligrosos y que probablemente tengan una vida útil muy breve, todo lo cual cuestiona que la cantidad recuperable sea tan grande como se dice y que, en última instancia, este tipo de explotación realmente merezca la pena —los próximos años lo confirmarán, pero de momento lo limitado de la producción hace pensar que, en efecto, son poco o nada rentables—.

En cuanto a los yacimientos en el Ártico, a estas dificultades se unen dos cuestiones clave. Por un lado, y salvo en sitios muy concretos, no se han identificado aún yacimientos de hidrocarburos que sean lo suficientemente grandes como para que merezca la pena su explotación, y es que la exploración del subsuelo ártico se halla aún en sus inicios. La otra cuestión clave es la dureza de las condiciones ambientales no ya para la explotación, sino ni tan siquiera para la exploración. Estamos hablando de una zona del planeta sumida en la penumbra o incluso en la oscuridad seis meses al año, donde soplan vientos sostenidos de gran fuerza, con temperaturas generalmente por debajo de cero y donde la presencia de icebergs es constante. Incluso bajo las hipótesis más adversas para la evolución del hielo ártico, este va a seguir formándose durante el invierno boreal y va a erigir masas suficientemente extensas como para aplastar el casco de una nave que tenga que mantener un geoposicionamiento dinámico sobre un punto fijo. Si la rentabilidad de los yacimientos en aguas profundas es dudosa, la de los yacimientos árticos es aún más especulativa y, probablemente, el doble de peligrosa. No cabe esperar, por tanto, ninguna solución mágica que proceda de este tipo de yacimientos.

6POR QUÉ NO SIRVEN LOS BIOCOMBUSTIBLES

Desde hace más de dos décadas, en la mayoría de los países occidentales es obligado por ley que una parte del suministro de los surtidores en las estaciones de servicio sea lo que la ley denomina *biocombustible*. Por *biocombustible* se entiende un líquido de origen vegetal que puede suplir —al menos parcialmente— los convencionales carburantes de origen fósil. El porcentaje de la mezcla que legalmente debe ser biocombustible de acuerdo con lo estipulado puede oscilar del 7% que obliga la Unión Europea hasta el 15% que rige en muchos estados norteamericanos. Dado que los biocombustibles tienen, en volumen, casi un 20% menos de poder energético que los combustibles fósiles, los combustibles que usamos ahora presentan menor contenido energético que el empleado por nuestros padres, aunque con la mejora de rendimiento de los coches no nos hayamos apercibido.

¿Por qué se introdujo esta obligación de mezclar los carburantes de origen fósil con un pobre sucedáneo, con menor poder energético y que, como veremos, acarrea muchos problemas? Hubo, en su momento, una motivación principal, a saber: disminuir la dependencia del exterior. La idea que tuvieron los legisladores en muchos países occidentales fue que los propios agricultores acabaran cultivando su combustible. Sin embargo, numerosos estudios muestran cómo el rendimiento energético de la mayoría de los biocombustibles es tan bajo que, en realidad, eso de cosechar la propia energía resulta un negocio ruinoso. Tan ruinoso, de hecho, que la adición de biocombustibles estuvo subvencionada por los Estados durante muchos años, a la espera de que la tecnología se desarrollase lo suficiente para que la rentabilidad energética subiera y, con ella, la rentabilidad económica, con el propósito de que, al final, el esfuerzo realizado hubiera merecido la pena. Este es un enfoque muy habitual cuando se habla de la problemática energética, y es que en los gabinetes de asesoramiento de los gobiernos y de las grandes empresas predomina la opinión de que, si no se han conseguido ciertos desarrollos, es porque aún se está remontando una

hipotética *curva de aprendizaje*, y no porque haya determinadas limitaciones impuestas por la física que hacen imposible ir más allá.

Sin embargo, lo que ha pasado en la práctica es que, al calor de la normativa que, por un lado, obligaba a la adición de biocombustibles y que, por otro, la subvencionaba, surgió una industria a escala global destinada al cultivo a gran escala de diversas plantas para la producción de biocombustibles. Por cierto que conviene aclarar desde el principio que el nombre más correcto para estas sustancias sería *agrocombustible*, puesto que el prefijo *bio-* podría dar a entender que son productos naturales y hasta cierto punto respetuosos con el medioambiente o con la biodiversidad, mientras que en realidad se trata de productos derivados de la actividad a gran escala del sector agroalimentario cultivados industrialmente; al mismo tiempo que muchas de las técnicas industriales usadas para la producción de biocombustibles los hacen muy dañinos para el medioambiente (por ejemplo, con la eutrofización de las aguas, la contaminación de los acuíferos, el empobrecimiento de la capa fértil, la pérdida de biodiversidad, los daños causados por el uso masivo de pesticidas, etcétera).

Pero es justamente por el uso de las técnicas a gran escala requeridas para poder cubrir tal nivel de demanda por lo que el rendimiento resulta tan bajo: así, para producir los dos millones de barriles diarios de agrocombustibles que se generan hoy en día en el mundo (el 2 % del total del petróleo producido), se utiliza una enorme cantidad de fertilizantes, pesticidas, tractores, cosechadoras y diversas máquinas de procesado, con un gran insumo de energía; un auténtico dislate energético, pero que hasta 2012 pudo ser marginalmente rentable gracias a las subvenciones. Lo interesante de todo esto es que, en realidad, era la gran abundancia de combustibles fósiles la que estaba dando esa subvención que permitía explotar los agrocombustibles. De ahí que, cuando los combustibles fósiles han comenzado a flaquear, se haya evidenciado que todo el esquema de los mal llamados *biocombustibles* carecía de sentido: no es casualidad que en 2012 tanto los Estados Unidos como la Unión Europea retiraran las subvenciones a su producción —aunque no la obligación de incorporarlos al combustible usado, lo cual es un absoluto contrasentido que aún se mantiene—.

Como se ha denunciado frecuentemente, la producción de agrocombustibles compite con los usos alimentarios y se llega a situaciones aberrantes. Por ejemplo, en 2011 los Estados Unidos desviaron el 43 % de la

producción de maíz para producir bioetanol (un producto del que muchos estudios muestran que posee un contenido energético inferior al que se gasta en su producción), mientras que a nivel mundial el 6,5% del grano cereal y el 8% de los aceites vegetales fueron destinados a agrocombustibles (según datos de la FAO). Argentina cultiva grandes cantidades de soja para la exportación y la producción de biodiésel (con un rendimiento energético solo un poco mejor que el del bioetanol estadounidense); por su parte, la producción de bioetanol de caña de azúcar en Brasil solo es rentable si no se cultiva y se deja crecer salvaje (lo cual limita la producción máxima) y el único gran cultivo realmente rentable a escala global es el del aceite de palma proveniente de Indonesia y Malasia, aunque sea difícil que se pueda mantener a largo plazo, pues las prácticas de cultivo usadas no son nada sostenibles, incluidos los repetidos incendios (que ahora, por desgracia, se están extendiendo, por similares motivos espurios, a la Amazonia brasileña).

Por si eso fuera poco, la introducción de agrocombustibles genera problemas nuevos, a veces de especial gravedad. Por ejemplo, el etanol de origen vegetal es corrosivo (como, en realidad, lo son la mayoría de los compuestos derivados del petróleo), lo cual obliga a introducir mayores inhibidores de la corrosión (es decir, más sustancias químicas potencialmente tóxicas o cancerígenas). Por otro lado, el biodiésel no es perfectamente equivalente al petrodiésel: su molécula es polar y más higroscópica (propensa a retener agua), por lo que puede acumular agua con mayor facilidad. Esta agua disminuye el poder combustible de la mezcla, pero, además, genera un problema aún peor: el agua suele formar una pequeña capa que rodea al biocombustible dentro del depósito de la gasolinera o del coche, y en esa interfaz demasiado a menudo proliferan colonias de bacterias y otros microorganismos, lo que genera una gelatina que puede producir obstrucciones en el motor y que, si llega a los inyectores, posiblemente cause una avería muy grave. Para evitar reclamaciones, los propietarios de las estaciones de servicio hacen tratamientos periódicos de sus depósitos de diésel con biocidas, los cuales esencialmente son antibióticos —no se puede negar que es una gran ironía: se desvía grano y aceite para producir agrocombustibles, lo que deja menos comida disponible para las personas más necesitadas, y, al dárselo a las máquinas, hemos conseguido que las máquinas padezcan enfermedades de

personas—. Añadan a esto que algunos biodiéseles, como el de aceite de palma, tienen puntos de fusión bastante altos, con lo que, a temperaturas moderadamente frías, solidifican y causan problemas semejantes que obligan al gran distribuidor de carburante a vigilar la previsión meteorológica a varios días vista para decidir su mezcla (y, si uno tiene un coche de diésel, no es de extrañar que en días repentinamente fríos el coche padezca una considerable merma de potencia; eso, si no se obstruyen los inyectores y el coche directamente se avería).

Todos estos problemas, en suma, suponen un incremento notable de los costes. En ocasiones, para evitar la escalada de los precios, algunos controles indispensables (por ejemplo, de contaminación microbiana en las cubas de combustible o de separación de los elementos de la mezcla) simplemente no se hacen debido a la actual complejidad de los carburantes, con consecuencias a veces fatales.

Llegados a este punto, ¿existe alguna buena perspectiva técnica sobre los biocombustibles que justifique estas penalidades actuales? En realidad, no. Un reciente y muy extenso estudio sobre biocombustibles realizado por el Ejército de los Estados Unidos, («Twenty-First Century Snake Oil: Why the United States Should Reject Biofuels as Part of a Rational National Security Energy Strategy», del capitán T. A. «Ike» Kiefer) muestra a las claras que no solo los actuales biocombustibles suponen un contrasentido energético, sino que hasta los proyectados biocombustibles de segunda generación (que provendrían de la fracción celulósica de los vegetales o de las algas marinas) tendrán siempre rendimientos energéticos muy bajos.

Sin embargo, los agrocombustibles presentan dos ventajas de tipo más bien político:

- Sirven para convertir el gas natural en algo parecido al petróleo. Efectivamente, la mayor parte del consumo de energía en los cultivos industriales se debe al uso de fertilizantes, los cuales consumen grandes cantidades de gas natural. Con esta estrategia podemos paliar parcialmente la falta de petróleo siempre y cuando sea otro el que asuma los costes directos y los menos directos (por ejemplo, el impacto ambiental). Pero esta estrategia no está exenta de problemas, sino al contrario: por un lado, la producción máxima de agrocombustibles es muy limitada si tenemos en cuenta las

necesidades de tierra cultivable, agua y fertilizantes; es difícil que jamás llegue a superar los cuatro millones de barriles diarios (equivalente a un 4% del consumo actual de petróleo) y lleva ya una década estancada en los dos millones de barriles diarios. Por otro lado, el pico de producción del gas natural está ya muy próximo, y el gas es necesario para ciertos usos concretos, así que, cuando comience a escasear, no será buena idea usarlo para producir más hidrocarburos líquidos, que son, además, de tan mala calidad.

- Han ayudado durante años a mantener la ficción de que aquí no pasaba nada. En efecto, gracias a esos dos millones de barriles diarios de agrocombustibles que llevamos añadiendo desde 2010, hemos podido disimular la dificultad que tiene el mundo para incrementar la producción de hidrocarburos líquidos. En el plano estadístico, además, han permitido una trampa contable, ya que en las estadísticas de producción de petróleo contamos dos veces la energía de los agrocombustibles; la primera, al computar el petróleo que va a los tractores, cosechadoras, etcétera, que se usan para producir los agrocombustibles; la segunda, al contar los barriles de agrocombustibles producidos. Eso sí: puede que se maquillen las estadísticas de producción de petróleo, pero, al aumentar la producción de agrocombustibles, se agrava el problema del hambre en el mundo.

En resumen, la producción de agrocombustibles fue un error estratégico guiado por una mala valoración de la capacidad de aumentar su producción, y hoy en día genera muchos más problemas que beneficios, con el inconveniente de que su producción no supone un incremento real de la energía disponible, pero sí significa una reducción de los alimentos disponibles para la humanidad.

7POR QUÉ NO PODEMOS PASARNOS AL GAS NATURAL

Hemos completado ya el repaso a las distintas fuentes de hidrocarburos líquidos alternativos al petróleo convencional y hemos visto que todas ellas tienen producciones muy limitadas que no pueden aumentarse de manera significativa (o no pueden hacerlo en absoluto). Mientras tanto, el petróleo crudo convencional sigue a buen ritmo su descenso, el cual va a verse incrementado en los próximos años a consecuencia de la desinversión que están llevando a cabo las petroleras, quienes ya van en pos de nuevas alternativas más rentables.

Así pues, deberíamos comenzar a estudiar a fondo las fuentes alternativas al petróleo que existen, sobre todo analizando si realmente pueden llegar a crecer lo bastante para compensar la falta de petróleo, o si pueden sustituirlo en todos sus usos y, en caso de no ser así, descubrir en cuáles no.

En los próximos tres capítulos (contando este), estudiaremos las otras tres fuentes de energía no renovable, a saber: el gas natural (que ahora explicaremos), el carbón y la energía nuclear. Veremos que las tres están aquejadas del mismo mal que el petróleo: la inminente llegada a su nivel de producción máximo y posterior declive, aparte de arrastrar muchos otros problemas que son específicos de cada una. Comencemos por el gas natural.

De todas las materias primas energéticas no renovables, el gas natural es la única que aún no presenta síntomas claros de estar llegando a su nivel máximo de extracción. La producción (y el consumo) de gas natural continúa creciendo año tras año, tanto el de los yacimientos convencionales como el de los yacimientos explotados con la técnica del *fracking*. Este mejor comportamiento de la explotación del gas natural ha llevado a que se considere como un combustible de conversión en muchos planes de transición energética hacia un futuro descarbonizado, ya que se libera menos CO_2 por caloría producida al usar gas natural que con cualquier otro combustible fósil. Sin embargo, el gas natural presenta una serie de limitaciones muy importantes que cuestionan ese futuro brillante que le quieren atribuir algunos.

Comencemos por la limitación principal del gas natural: su pico de producción. Dado que todavía estamos en la fase creciente de la producción de gas natural, aún existe cierta incertidumbre en torno al momento exacto en que tendrá lugar ese nivel máximo de extracción del gas natural. De manera análoga a lo que pasa con el petróleo, hace años que los nuevos descubrimientos de yacimientos de gas natural convencional están decreciendo, lo cual es un indicio de la llegada al pico productivo. Sin embargo, contribuye a la confusión sobre el futuro de la producción de gas natural el hecho de que los descubrimientos de yacimientos de gas de *fracking*hayan seguido aumentando, junto con todas las exageraciones vertidas sobre el potencial de ese recurso, aunque ya haga años que quedó acreditado que, si bien con el petróleo de fractura hidráulica era difícil ganar dinero, con el gas de *fracking* este se pierde a manos llenas. En cualquier caso, a medida que nos estamos aproximando al momento preciso en que se va a producir el pico del gas natural, la diferencia entre las diversas previsiones se estrecha cada vez más. Los estudios más recientes nos indican un rango de fechas previstas para el pico del gas natural convencional situado entre 2023 y 2027, por lo que podemos aceptar con cierta fiabilidad que el pico del gas natural se va a producir alrededor de 2025 y, en todo caso, antes de 2030. Pero, si contamos con el gas del *fracking* que se explota principalmente en los Estados Unidos, incluso aceptando las previsiones más optimistas y la realidad de que sigan perdiendo dinero, solamente se retrasaría el pico de producción del gas natural hasta 2030. Asimismo, un hecho que destacan los diversos estudios, es que, si comenzáramos a utilizar de forma masiva el gas natural, podríamos acelerar el proceso y llegar antes al pico de producción. Sea como fuere, es evidente que no podemos confiar en que sea el gas natural el que nos proporcione una alternativa duradera al petróleo, puesto que en breve (a una escala histórica) se va a encontrar en la misma situación de declive terminal.

Se podría argumentar que, a pesar de que el gas vaya a entrar pronto en una situación de declive terminal, aún puede ayudar a suplir algunos problemas concretos que nos seguirán aquejando, asociados a la disminución de la disponibilidad de petróleo. Sin embargo, en muchos sentidos el gas natural es un combustible mucho menos conveniente que los derivados del petróleo, lo cual lo incapacita como una solución transitoria

viable. El problema principal consiste en que los costes de inversión resultan excesivamente onerosos y difíciles de recuperar.

A diferencia del petróleo y de sus combustibles, que son líquidos y, por tanto, fáciles de almacenar y transportar, el gas natural es gaseoso y, en consecuencia, volátil; de ahí que requiera un manejo más complicado. Los gases tienden a expandirse y a difundirse. Lo primero es malo, porque un gas ocupará siempre todo el espacio disponible que se le deje, pero contendrá la misma cantidad de energía, por lo que, si no se almacena a cierta presión, la cantidad de energía por volumen puede ser muy pequeña. Y lo segundo, su tendencia a difundirse, resulta aún peor: una pequeña fisura en el depósito y el gas se escapa y se pierde en el aire (y eso si no provoca una deflagración por culpa de una chispa fortuita). Esta dificultad en el manejo del gas es lo que explica que sus mercados tiendan a ser muy regionales. El transporte de gas a larga distancia se realiza principalmente a través de gasoductos, que son largas conducciones de gas que conectan países en un mismo continente. Para el transporte intercontinental, la única opción es el uso de buques metaneros, encargados de llevar el gas natural licuado (a altas presiones y bajas temperaturas), lo cual implica una grandísima inversión, tanto en el propio barco como en la estación de carga (instalaciones de licuefacción de gas natural) y también en el puerto de recepción (estación de regasificación y conexión con la red de gasoductos nacional).

La presencia de gas natural en los yacimientos de hidrocarburos es muy habitual, porque, como ya comentamos en capítulos anteriores, los hidrocarburos líquidos sometidos a ciertos procesos de degradación se acaban disociando en metano, pues eso es en esencia el gas natural. Un chiste común en el sector del petróleo que ejemplifica hasta qué punto es frecuente encontrarse con gas natural en los yacimientos dice así: «Jefe, ya hemos perforado el pozo. La mala noticia es que no hay petróleo. La buena noticia es que no hay gas natural». Y es que, debido a las dificultades de su manejo, la presencia de gas natural es, en muchos casos, un problema: hasta el 20 % de todo el gas natural que se extrae de la tierra es quemado directamente en la explotación (son esas torres-antorcha que, a veces, se ven en las películas) o directamente aventado (cosa que cada vez se intenta evitar más, ya que el metano es un gas de efecto invernadero aún más potente que el dióxido de carbono). No en vano, en la mayoría de los

accidentes en los que se produce una deflagración en un pozo de petróleo o en una plataforma petrolífera en alta mar, el problema lo causa una burbuja de gas natural que emerge súbitamente a la superficie.

Solo en determinados yacimientos en los que la presencia de gas natural es abundante y puede ser extraído de manera muy controlada merece la pena plantearse su explotación comercial. Además de implicar grandes inversiones por las dificultades de su manejo, el valor comercial del gas natural resulta bastante inferior al del petróleo (alrededor de la mitad de precio por caloría), por lo que son pocos los países que se lanzan a su explotación.

Otro obstáculo que limita la distribución del gas natural son los factores geopolíticos, mucho más restrictivos que en el caso del petróleo. Así como el petróleo se puede transportar en grandes cantidades a través de buques petroleros, el gas natural necesita confiar en una red de gasoductos que lleve esta materia primera desde el productor hasta sus consumidores. Algunos países, como Irán, tienen verdaderas dificultades en conseguir una vía de paso adecuada para sus gasoductos hacia Europa; de hecho, una buena parte de la tensión geopolítica en Oriente Medio en los últimos años guarda relación con la descarnada competencia entre el gasoducto que promueve Irán y el de Arabia Saudita. Además, los gasoductos son instalaciones de miles de kilómetros que atraviesan muchos países, algunos de ellos ciertamente inestables, y son, por tanto, tremendamente vulnerables a los ataques. Eso, de nuevo, limita la capacidad de comercializar el gas natural.

Europa tiene dos suministradores principales de gas natural. El principal es Rusia, quien hizo construir dos grandes gasoductos a través del lecho del mar Báltico para llevar directamente el gas hasta Alemania, con lo que evitaba pasar por repúblicas exsoviéticas que no siempre sintonizan con la madre Rusia (por ejemplo, Ucrania o Bielorrusia). El problema del gas ruso es que sus campos presentan claros síntomas de agotamiento: la principal fuente de este país se sitúa ahora en la Siberia Oriental, a miles de kilómetros de Europa, porque a Rusia ya no le quedan yacimientos que explotar. Lo más probable es, pues, que la producción de gas ruso en los próximos años comience su declive terminal y que Rusia se oriente a mercados de mayor proximidad geográfica (y, por tanto, más rentables, por

el menor coste de transporte), mayoritariamente hacia China, con quien ha firmado un gran acuerdo comercial.

El otro gran suministrador de gas natural para Europa es Argelia, importante sobre todo para España (el 60 % del gas que consumimos proviene de allí), Francia y, en menor medida, Italia. La producción de gas argelino lleva estancada desde 2010 y con claros síntomas de descenso tras producirse numerosas protestas españolas por episodios de baja calidad en el gas suministrado.

Al fallar Rusia y Argelia, Europa intentará ampliar en buena medida sus vías de suministro hacia Oriente Medio y, de manera más marginal, hacia otros proveedores, incluso los Estados Unidos. Sin embargo, nada parece ser capaz de ofrecer un suministro continuado durante las próximas décadas, así que Europa se encuentra probablemente ya en el cénit del suministro de gas natural.

La conclusión es que el gas natural no supone ninguna solución ni ayuda para la crisis energética que plantea el petróleo. En el contexto mundial, porque en los próximos años la producción de gas natural estará inmersa en su propio proceso de declive, y en el contexto de Europa, porque nuestros suministradores principales ya han superado ese punto y nuestros problemas con el gas natural vienen ahora.

8POR QUÉ NO SERÁ EL CARBÓN QUIEN RESUELVA EL PROBLEMA

De todos los combustibles fósiles, el que posee con diferencia las reservas más grandes es el carbón. Al ritmo del consumo actual, las reservas de carbón durarían un par de siglos como mínimo. A estas alturas ya sabemos, sin embargo, que ninguna materia prima puede extraerse a un ritmo constante, sino que necesariamente sigue una cierta curva de producción, con un período de ascenso, una llegada al nivel máximo o pico y una ulterior fase de descenso terminal. En este sentido, el carbón no constituye una excepción: no importa tanto cuántas reservas de carbón haya, sino a qué ritmo puedan ser extraídas. En el caso particular del carbón, por las características de su explotación (se extrae a través de minas, lo cual permite modular mejor el ritmo de extracción, puesto que se accede directamente al mineral), se podría alcanzar un ritmo de descenso más paulatino y suave que el del petróleo. La combinación de ambos factores (grandes reservas y ritmo de descenso más moderado) hacía suponer que el pico de producción de carbón no iba a producirse hasta mediados del siglo XXI: hacia 2000, diversos estudios sobre la evolución de los yacimientos de carbón estimaron que la producción máxima de energía del carbón no iba a suceder antes de 2035 y, más probablemente, entre 2040 y 2050.

Sin embargo, estas previsiones han resultado ser demasiado optimistas por factores que no fueron tenidos en cuenta y que van más allá de la geología. La producción mundial de carbón llegó a su nivel máximo en 2015 y, de manera consistente, ha decrecido desde entonces. Aun cuando no se pueda descartar que llegue a recuperarse levemente en los próximos años, lo más probable es que estemos entrando ya en la fase final de declive en la producción de carbón.

Uno de los factores más restrictivos en la producción de carbón tiene que ver con el esfuerzo logístico que implica la extracción del mineral en los yacimientos que van quedando. Al igual que con el petróleo, los mejores yacimientos hace tiempo que están agotados y, en la actualidad, no queda

más remedio que recurrir a yacimientos más profundos, con menos contenido en carbón y con mineral de peor calidad. Hoy en día, los carbones de mayor calidad (antracitas y hullas) representan menos de la mitad de la producción total, porque se ha tenido que recurrir, cada vez en mayor medida, a los carbones subbituminosos y al lignito, que tienen poco poder calorífico e incrementan enormemente las emisiones de CO_2 por caloría producida. Estos carbones de tan bajo poder calorífico necesitan un tipo de mina muy diferente, y es habitual recurrir a las minas a cielo abierto que ocupan y devastan una amplia superficie del territorio (como la mina abierta hace poco por Alemania en el bosque de Hambach) o al desmontado de montes (destruyendo literalmente toda la parte superior de las montañas para poder acceder a los filones, como se hace de forma masiva en los Apalaches). Al escaso poder energético de los carbones extraídos, se le añade el mayor coste de estas explotaciones, que hacen que tengan un interés energético y económico limitado. De hecho, las explotaciones de lignito suelen consumirse en el mismo país de producción, porque, si hubiera que añadirles los costes de transporte, sería completamente imposible que fueran rentables.

Otro de los problemas para expandir la explotación del carbón tiene que ver con las limitaciones de su uso. El país que más carbón emplea en el mundo es China y, a pesar de que a buen seguro querría usar aún más carbón, ha llegado a un punto de saturación real. Los camiones que trasladan el carbón desde Manchuria hasta las numerosas centrales térmicas chinas generan frecuentemente atascos (en algún caso, de más de cien kilómetros de largo y de una duración de hasta cuatro días). Está el problema añadido de la contaminación: la calidad del aire en algunas zonas de China es tan mala que causa numerosos problemas de salud en la población, e incluso ha llegado a haber revueltas ciudadanas muy severas a pesar de la fuerte represión que ejercen las autoridades chinas.

La imposibilidad de China de absorber más carbón es la razón principal por la cual se ha alcanzado un primer pico en su producción. En estos últimos años, la India ha incrementado también de forma considerable su consumo, y eso bien podría impulsar de nuevo la producción (pues, geológicamente, la producción de carbón aún tiene algo de margen para crecer) y llevar a superar el nivel de 2015, aunque, debido a los mismos problemas de China, y también por el hecho de que las reservas de carbón

de la India no son tan grandes, el segundo pico se produciría antes de 2030. Debemos tener en cuenta, además, que muchas minas de carbón se operan en localizaciones remotas y para su explotación se precisan grandes cantidades de diésel (destinadas a la electricidad de los compresores, los camiones que transportan el carbón y sus residuos, etcétera), por lo que las dificultades que vamos a experimentar en los próximos años con el suministro de diésel van a afectar a la producción de carbón e impedir que la extracción de esta última materia prima pueda llegar a alcanzar los niveles potencialmente máximos.

En resumen, estamos viviendo los últimos años antes de la caída definitiva de la producción de carbón, un declive que sin duda se prolongará durante muchas décadas (bastantes más que las del petróleo y del gas), pero que hace que sea imposible pensar en usar el carbón para una sustitución efectiva del petróleo. El inevitable declive del carbón va a traer problemas con el suministro eléctrico en diversos países, y particularmente en los dos que poseen las mayores reservas de carbón: los Estados Unidos y China, que —no por casualidad— son los dos países que más electricidad generan en centrales térmicas de carbón. Mención especial merece Alemania, donde más del 40 % de la electricidad se genera quemando carbón, con una proporción creciente del lignito nacional: el gran despliegue de la energía eléctrica de origen renovable en Alemania (que pasó del 8 % en 2000 al 38 % en 2017 —recuerden que hablamos solo de electricidad, esto es, del 20 % de toda la energía final consumida—) no ha servido en el país teutón para sustituir a la electricidad generada a través del carbón, sino a la electricidad de origen nuclear (que, esta sí, se ha reducido a la mitad). Alemania no ha abandonado el carbón, como tampoco lo han hecho ni los Estados Unidos ni China, por la misma razón que la India está aumentando su consumo: porque económicamente sigue siendo muy competitivo para la producción de electricidad, y estos países, en los que la prioridad sigue siendo la competitividad de su industria, no pueden permitirse llevar a cabo la transición a medios de producción eléctrica más caros si no lo hacen también sus competidores. He aquí el gran drama del carbón: se trata del combustible más contaminante (no solo por la producción de CO_2, sino de dióxido de azufre —gas que, al combinarse con la lluvia, genera ácido sulfúrico, la temible lluvia ácida—, óxidos de nitrógeno, hollín y algunas sustancias cancerígenas) y, además, en los próximos años iremos

disponiendo cada vez de menos carbón, aun siendo fundamental para la industria.

Si la disminución de la producción de carbón que tendrá lugar durante las próximas décadas supone un grave problema para conseguir una electricidad a precio competitivo para la industria mundial, existe otro problema aún mayor asociado al descenso del carbón: la necesidad de contar con carbón de coque para la producción de acero. La fundición de hierro en altos hornos para la elaboración de acero requiere un tipo de carbón especial, de alto contenido en carbono, llamado *carbón de coque*, en un proceso que no solo es físico (por la alta temperatura), sino también químico. Además, el carbón de coque se usa por similares motivos en la fundición de otros metales. Aunque antiguamente se utilizara carbón vegetal para generar coque, sería impensable mantener el enorme volumen de acero que se produce hoy en día sin el carbón de coque. El mayor productor de este carbón es Australia y, aunque este país no haya llegado aún a su nivel máximo de extracción, no parece quedar muy lejos. En el momento en que la producción mundial de carbón de coque comience a declinar, este hecho por sí solo supondrá una verdadera revolución, porque afectará a la industria metalúrgica en general y, más particularmente, a la del acero. Si el diésel, como decíamos, es la sangre de la civilización industrial, el acero son sus huesos: al tratarse de un material fundamental en la construcción y en la fabricación de prácticamente todo, la vida moderna no se podría concebir sin él, aunque, a diferencia del diésel, pueda ser reciclado.

En el caso concreto de España, el carbón ocupa una posición estratégica. Es la única materia prima energética de la cual hay reservas significativas en nuestro país, aunque en general lo que quede sea de calidad media-baja. Una de las razones por las cuales el carbón resulta estratégico para España es la posibilidad de utilizarlo, mediante el proceso de Fischer-Tropsch, en la síntesis de combustibles líquidos. En una situación de pérdida repentina de suministro de petróleo (por ejemplo, por una crisis de gran alcance en el golfo Pérsico), España podría alimentar sus vehículos de emergencia y los necesarios para cubrir las necesidades más imperiosas usando los combustibles líquidos derivados del carbón nacional. El proceso de Fischer-Tropsch no es muy rentable (aproximadamente la mitad de la energía que contiene el carbón se pierde en la conversión), pero permite obtener

combustible que puede usarse directamente en camiones, tractores y otros vehículos; por tanto, su interés no es comercial, sino estratégico para una situación de emergencia. De manera análoga, otros países que conservan reservas significativas de carbón de baja calidad, y que ya no están siendo explotadas, seguramente contarán con ellas en una situación de emergencia. Algunas variantes del proceso de Fischer-Tropsch permiten una conversión del carbón a combustible líquido *in situ*, es decir, realizando todo el proceso mediante la inyección de las sustancias requeridas (fundamentalmente, de agua) en presencia de los catalizadores metálicos introducidos con anterioridad. Este tipo de instalación, aunque muy costosa, permite evitar uno de los mayores problemas de las plantas de conversión de carbón a líquidos, a saber: la gestión de los residuos tóxicos que se generan (ya que los residuos quedan directamente enterrados bajo tierra). Además, las plantas de conversión *in situ*evitan todo el proceso de minado, que también es muy costoso. En conclusión, la producción de combustibles líquidos a partir del carbón podría ser una buena alternativa para hacer frente a una futura escasez de combustibles derivados del petróleo, aunque solo en moderadas cantidades y por un tiempo limitado, mientras se toman las medidas oportunas a fin de combatir dicha escasez.

En resumen, aunque el carbón seguramente vaya a seguir siendo un combustible importante durante las próximas décadas, el principio de su decadencia queda cerca (si no es que se ha superado ya) y en modo alguno va a poder sustituir al petróleo, sino tan solo proporcionar cierta ayuda momentánea. Además, a largo plazo, el retroceso del carbón va a traer consigo otros problemas asociados, tales como el encarecimiento —incluso la disminución— de la producción de electricidad y la falta de acero de nueva fundición.

9POR QUÉ NO ENCONTRAREMOS LA SOLUCIÓN EN LA ENERGÍA NUCLEAR

Los primeros reactores nucleares experimentales datan del ensayo que se hizo durante la Segunda Guerra Mundial para conseguir desarrollar las bombas atómicas, aunque el gran despegue de esta energía tuviera lugar durante la década de 1950. En aquella época se depositaron grandes esperanzas en esta forma de energía: deslumbraba lo avanzado de su tecnología y la inmensa cantidad energética que se podía obtener a través de suministros muy modestos del combustible nuclear. En aquella época era habitual decir que, gracias a la revolución nuclear, la electricidad sería pronto demasiado barata como para tomarse la molestia de poner contadores («*too cheap to meter*»).

Han pasado siete décadas desde aquellos años y la energía nuclear sigue siendo la más modesta de las fuentes de energía no renovable: de acuerdo con el Anuario Estadístico de BP 2018, las cuatro materias primas energéticas no renovables representaron el 90 % de toda la energía primaria global, repartidas de la siguiente manera: un 34,2 % de petróleo, un 27,6 % de carbón, un 23,4 % de gas natural y solo el 4,4 % de energía nuclear. Por añadidura, en este cómputo se favorece de manera artificiosa la energía nuclear, pues se contabiliza toda la energía calórica producida por la fisión del uranio en los reactores, cuando en la práctica solo se aprovecha el 35 % (a través de la conversión del agua líquida en vapor, que es lo que mueve las turbinas de los alternadores que generan en última instancia la electricidad).

Los defensores de la energía nuclear suelen argumentar que, si esta no ha ocupado un lugar más importante en nuestras sociedades, es porque hay una fuerte oposición contra ella entre los grupos ecologistas, preocupados por los riesgos que implica. Sin embargo, existen razones de mayor peso que la mera oposición de ciertos grupos sociales a la hora de entender por qué la energía nuclear lleva muchos años estancada y con tendencia a decaer.

La primera cuestión es el bajo rendimiento energético. Una central nuclear es una instalación compleja en la que se deben establecer numerosos sistemas y protocolos de seguridad. La construcción de centrales nucleares recibe, en muchos casos, subvenciones de los Estados, porque los costes de construcción son cuantiosos, en ocasiones varias veces mayores que los costes anunciados al principio. Así, por ejemplo, el tercer reactor de la planta nuclear Olkiluoto, en Finlandia, fue inicialmente presupuestado en tres mil millones de euros, pero, después de numerosos retrasos, tuvo un coste de construcción casi tres veces mayor, de ocho mil quinientos millones, y no se espera que pueda ser operativo antes de 2021. Este tipo de retrasos, sobrecostes y anomalías son frecuentes en el sector precisamente por las exigencias de las regulaciones en seguridad, cada vez más estrictas, aunque sin duda necesarias. Los costes operativos de las centrales nucleares, por el contrario, son mucho más pequeños, y, según quién haga la contabilidad de costes, puede llegar a afirmar que las centrales nucleares son rentables, aunque suela argumentarse que el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial es aproximadamente igual al de su vida útil —lo que demostraría la nula rentabilidad de estas instalaciones si los Estados no asumen sus costes de construcción—. Existe, además, un coste que generalmente no se suele contabilizar adrede, que es el de desmantelamiento de la central, y sobre el que se cuenta con poca experiencia: así, por ejemplo, de los ciento quince reactores nucleares que han dejado de utilizarse al acabar su vida útil, solo diecisiete han sido por completo desmantelados, y generalmente con unos costes mucho mayores de lo previsto y en todos los casos, salvo uno, dejando una parte de los residuos en el mismo emplazamiento del reactor. En realidad, la apuesta por la energía nuclear tiene un fuerte componente político: garantizar una primacía en un sector considerado estratégico por razones tecnológicas y militares.

Otro de los motivos de la baja rentabilidad de la energía nuclear guarda relación con el tipo de energía producida: la electricidad. Esta es una forma de energía de alto valor añadido, muy útil para muchas aplicaciones y en particular para el sector doméstico, de automatización y de control. A pesar de ello, las sociedades industriales precisan —en mucha mayor cantidad— energía en otras formas, ya sea como líquidos energéticamente densos que permitan mover máquinas con autonomía (coches, camiones, tractores,

barcos), ya como calor a diversas temperaturas (por ejemplo, quemando gas natural en las cementeras). La realidad es que hoy en día, en las sociedades industrializadas, el consumo de energía eléctrica supone solo alrededor del 20 % del total de la energía final (esto es, lista para ser utilizada). Por tanto, producir solamente electricidad es un hándicap importante para las centrales nucleares, porque su energía no es apta para muchos usos necesarios, y eso limita el interés y el desarrollo de la energía nuclear —hasta el punto de existir un fuerte paralelismo entre los episodios de escasez de petróleo y los de descenso en el consumo de energía nuclear—. La energía nuclear es considerada por muchos autores como una mera extensión de los combustibles fósiles, algo que permite obtener un poco más de energía siempre que haya energía fósil disponible (por cierto que, como veremos más tarde, este problema también aqueja a los sistemas renovables orientados a la producción de electricidad).

Otra cuestión importante es la escasez de uranio. El coste del combustible nuclear es bastante pequeño comparado con los costes totales de operación de una central nuclear (se suele aducir una cifra que gira en torno al 5 y el 8 %). Esto ha llevado a muchos de los defensores de esta fuente energética a afirmar que no hay problema con el uranio, porque, de acuerdo con su línea argumental, si faltase uranio, su precio se dispararía. Sin embargo, este razonamiento presenta ciertos fallos lógicos. El primero es que el pico del uranio, que aparentemente ya se ha producido, sucedió en 2016, así que aún es demasiado pronto para que se noten sus efectos, ya que el ritmo de caída de la producción es lento al principio. Por otra parte, el parque de centrales nucleares lleva prácticamente estancado desde hace veinte años, con lo que la demanda no crece sustancialmente y eso retrasa el momento en el que los efectos del pico del uranio vayan a comenzar a notarse. Por último, hasta el 16 % del total del uranio consumido anualmente proviene de las denominadas reservas secundarias, es decir, de uranio extraído en las pasadas décadas, pero que no fue consumido en su momento. La mayoría de estas reservas secundarias proviene de bombas atómicas, que están siendo desmanteladas conforme a los tratados internaciones de desarme. La previsión del ritmo de declive en la producción de uranio para los próximos años anticipa el surgimiento de problemas en el suministro de uranio a partir de 2025, según la Agencia Internacional de la Energía.

Cuando se les constata la realidad del declive en la producción de uranio y las limitaciones que supone el reprocesamiento del combustible gastado, los defensores de la energía nuclear suelen mencionar, como solución a la escasez de material físil, la llegada próxima de los reactores de IV generación. Este tipo de reactores operarían con neutrones rápidos, a diferencia de los neutrones térmicos o lentos de los reactores de fisión convencional, de modo que podrían aprovecharse materiales como el torio, muchísimo más abundante en la corteza terrestre y que no es, en sí mismo, radiactivo, pues se transmuta justamente en uranio en el propio reactor. Este tipo de reactor es teóricamente más seguro en términos de residuos radioactivos, ya que el propio reactor los consumiría durante su proceso y la cantidad final de residuos sería despreciable, y siempre se podrían *quemar* en una nueva ronda operativa. El gran problema de los reactores de IV generación es que no se trata, ni mucho menos, de una tecnología nueva: hace ya más de setenta años que llevamos experimentando con ella y presenta numerosas dificultades técnicas que son difíciles de soslayar. Además, un reactor de neutrones rápidos es muchísimo más peligroso que un reactor nuclear convencional, porque, si en este último el peor accidente que puede ocurrir es la fusión del núcleo (que la reacción se descontrole y las altas temperaturas alcanzadas conviertan todo el material fisible en una lava radioactiva que emita radiación y elementos radioactivos a la atmósfera, si bien puede ser —con dificultad— confinada), en el caso de los reactores de neutrones rápidos un incidente grave podría ocasionar una verdadera explosión nuclear. Mantener el control en un reactor de neutrones rápidos no es tarea sencilla, y por ese motivo en el mundo solo ha habido una decena de prototipos con escasa explotación comercial. No se están produciendo avances tecnológicos reseñables en este sector desde hace décadas, así que no es una alternativa en la que se pueda confiar.

La otra gran tecnología nuclear es la de la fusión. Al contrario de lo que sucede en los reactores nucleares convencionales, que son de fisión y en los que el objetivo es aprovechar la energía que se libera al romper núcleos de número atómico elevado, en el caso de la fusión se pretende aprovechar la energía que se libera al fusionar núcleos ligeros. En general, lo que se persigue es fusionar núcleos de dos isótopos del hidrógeno —el deuterio y el tritio— para conseguir un núcleo de helio y un neutrón libre. Ese neutrón

libre debería servir para impactar en una capa de litio y transmutarlo en tritio, el cual se aprovecharía en el mismo reactor. Existen diversos proyectos para conseguir un reactor comercial de fusión nuclear, el más conocido de los cuales es el proyecto internacional Fusion for Energy, el cual está a cargo de la construcción del reactor ITER en Cadarache, Francia. Los reactores de fusión afrontan problemas similares, de los cuales los más importantes son: la dificultad de confinar el plasma que genera la fusión durante el tiempo necesario para poder aprovechar su energía, que el proceso de fusión produzca más energía que la que se consume al *encender* la reacción, la resistencia de la pared de contención (que debe ser al mismo tiempo muy resistente y muy porosa para dejar pasar el flujo de neutrones que tengan que impactar en la capa de litio) y los problemas relativos a la extracción del tritio transmutado de la capa de litio, teniendo en cuenta que es un elemento muy inestable y que puede producir deflagraciones nucleares aun en pequeñas cantidades. Las dificultades técnicas que plantea la fusión están muy lejos de ser resueltas, e incluso algunas de las necesidades tecnológicas de un reactor de fusión pueden resultar físicamente inalcanzables (como han denunciado varios premios Nobel de Física). Hay una broma recurrente en el sector, y es que siempre faltan cincuenta años para que tengamos el primer reactor comercial de fusión. Sin llegar a eso, de acuerdo con los planes de Fusion for Energy para los tres reactores experimentales que se precisan construir para intentar resolver los diversos problemas técnicos (ITER, PROTO y DEMO), incluso en el mejor de los escenarios no habría un reactor comercial antes de 2050. Demasiado tarde para que pueda ayudar a resolver los problemas que tenemos ya, y eso sin contar con los retrasos que se acumulan de forma recurrente en este proyecto.

En resumen, a pesar de que sus defensores la enarbolen como una tecnología de futuro muy conveniente en la transición ecológica gracias a sus bajas emisiones de CO_2, lo cierto es que la energía nuclear es una opción con más pasado que futuro por delante. La energía de fisión está fuertemente limitada por la escasez de uranio y por su bajo rendimiento económico y, en cuanto a las promesas tecnológicas (tanto los reactores de fisión de neutrones rápidos como los de fusión), no parece verosímil que vayan a cumplirse nunca.

10POR QUÉ NO CRECERÁ MÁS LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La energía hidroeléctrica es la más importante de las energías renovables, y llega a producir más del 6% de toda la energía primaria consumida en todo el mundo, de acuerdo con los datos del Anuario Estadístico de BP. Déjenme que haga aquí un pequeño inciso: algunos autores (incluso la Agencia Internacional de la Energía) dicen que la primera fuente de energía renovable es la *biomasa*, puesto que incluyen en la generación de energía por biomasa la que se produce al quemar leña por parte de pequeños agricultores en todo el mundo. La estimación exacta de cuánta energía se está usando de esta manera presenta un gran margen de error, aparte de ser un uso muy poco eficiente. Por eso BP y otros autores siguen el criterio de no computar este empleo de la biomasa porque, además, no contribuye al sostenimiento de la sociedad industrial ni tampoco puede aumentarse significativamente, so pena de arrasar los bosques y hacer así imposible la continuidad de su explotación.

La energía hidroeléctrica se consigue al construir una gran pared de presa en un valle por el que discurre un río de cierto caudal, de manera que el agua se acumule hasta la altura máxima que permite la presa. Esa agua se deja pasar por unas compuertas mientras la fuerza hidráulica del flujo mueve unas turbinas conectadas a un alternador, que es el que genera la energía eléctrica.

La energía hidroeléctrica se lleva explotando en el mundo prácticamente desde el comienzo del consumo masivo de la electricidad, con la llegada de la Segunda Revolución Industrial, es decir, hace un siglo y medio. Las primeras grandes presas hidráulicas datan de principios del siglo XX y, desde sus inicios, la energía hidroeléctrica se ha mostrado como una fuente fiable y, algo muy importante en la producción de electricidad, regulable. Eso quiere decir que es muy fácil producir mayor o menor electricidad bajo demanda simplemente al abrir o cerrar más compuertas. Asimismo, el régimen pluvial de las grandes cuencas fluviales es bastante constante, de modo que, con una adecuada gestión de la presa, es posible obtener una alta

disponibilidad y fiabilidad a la hora de producir energía. Por otro lado, los grandes muros de presa se construyen de tal manera que su duración excede los cien años con facilidad y, encima, la tecnología implicada es mucho más sencilla que la de otras opciones, pues es mucho más fácil de mantener y reparar, aparte de suponer menos riesgos ambientales. Eso no quiere decir que el impacto de una presa sea inocuo, por supuesto: la presencia de la presa afecta a la vida del río represado y la acumulación de agua puede alterar los procesos de evaporación y precipitación de un área relativamente grande próxima al embalse. Por otro lado, la presencia de la presa conlleva también ciertos riesgos, de los cuales los más importantes son: la acumulación de residuos tóxicos y el riesgo para las poblaciones emplazadas río abajo en caso de una ruptura o desembalse de emergencia.

Con todo, el mayor problema de la energía hidroeléctrica en la transición energética proviene de que se trata de una tecnología largamente explotada y, por tanto, el potencial añadido que pueda ofrecernos es muy limitado. Hay ciertas regiones del planeta en las cuales prácticamente no se ha explotado la energía hidroeléctrica y por eso, en todo el mundo, su potencial de crecimiento aún resulta elevado y puede llegar a duplicarse con respecto a los valores actuales. Sin embargo, a lo largo de todo el mundo occidental la energía hidroeléctrica ha agotado su recorrido de manera efectiva, e incluso contando con proyectos de minihidroeléctrica y microhidroeléctrica (presas muy pequeñas, prácticamente domésticas, en cursos de agua de poco caudal y generalmente irregulares), es difícil que se pueda aumentar la producción de hidroelectricidad más de un 10 % con respecto a los niveles actuales en los países de la OCDE. Por ese motivo, en particular en España, cuando se habla de energías renovables, raramente se hace mención a la hidroelectricidad, a pesar de que es la más importante de nuestras energías renovables hoy en día (ha habido algunos años en que hasta el 20 % de todo el consumo eléctrico anual español ha sido hidroeléctrico).

Otro de los problemas que tiene la hidroelectricidad guarda relación con los procesos que va a traer consigo el cambio climático. Al modificarse el régimen de lluvias, la seguridad que antaño nos aportaba la presencia de presas, no solamente en la producción de electricidad, sino también en el suministro de agua de riego y de agua potable, se va a ver seriamente afectada. Estos años pasados hemos visto cómo el trasvase Tajo-Segura se volvía virtualmente inútil, dado el escaso caudal del río Tajo. En el caso

particular de España, donde la mayoría de los modelos climáticos predicen un aumento de las sequías y un incremento del riesgo de desertificación, el desafío que representa el cambio climático significará que los recursos hídricos deban gestionarse de manera diferente de la actual, y eso probablemente se haga en detrimento de la capacidad hidroeléctrica, al primarse otros usos del agua.

Se ha mencionado en ocasiones que las presas hidráulicas pueden aprovecharse para gestionar los problemas de intermitencia de otras fuentes de energía renovable: así, en los momentos en que los parques eólicos y solares proporcionasen una energía excedentaria (que, de otro modo, se perdería), centrales de bombeo inverso tomarían agua de río abajo y la devolverían a la presa, donde se almacenaría para ser reaprovechada en la generación hidroeléctrica en los momentos en que el resto de los sistemas renovables no fueran capaces de dar energía. Sin embargo, el bombeo inverso supone una mala solución técnica. En primer lugar, por la gran cantidad de sistemas de bombeo inverso que se tendrían que instalar para reaprovechar esos excedentes de energía. En segundo lugar, porque el bombeo inverso reduciría el caudal río abajo, con posibles afectaciones graves para las poblaciones humanas y ecosistemas que allí se encuentren, hasta el punto de resultar imposible en situaciones en que el caudal del río sea demasiado bajo por la sequía. Y, por último, porque en realidad no es electricidad lo que más falta nos hace, sino otros usos de la energía, como ya hemos comentado más arriba. Y es que, al igual que la energía nuclear, las presas hidráulicas están orientadas a la producción de electricidad, de la cual en países como España somos excedentarios (tenemos 108 GW de potencia instalada, más que de sobra para cubrir un consumo medio de 32 GW y uno máximo de 45 GW).

Mencionemos, por último, el considerado como talón de Aquiles de la energía hidroeléctrica: la colmatación de los pantanos. Incluso en cuencas bien gestionadas, el ritmo de colmatación (acumulación de sedimentos arrastrados por el río) no baja del 0,5% anual. Es decir, en presas bien gestionadas, la acumulación de sedimentos reduce su capacidad en un 0,5% del total cada año, por lo que la presa perdería completamente su capacidad de almacenar agua en dos siglos a lo sumo, y mucho antes de eso ya sería inútil desde el punto de vista de la producción de electricidad (cuando los sedimentos llegasen a la altura de las compuertas). La única manera de

luchar contra la colmatación consiste en vaciar por completo la presa y eliminar los sedimentos usando maquinaria pesada (excavadoras y camiones), lo cual se conseguiría con un gran consumo de petróleo, o simplemente desmantelar el muro de presa y dejar que la naturaleza haga su trabajo y arrastre los sedimentos río abajo hasta llegar al mar. Así pues, la colmatación introduce un tope de vida útil en las presas hidráulicas, so pena de incurrir en unos costes energéticos y económicos que podrían poner en cuestión la utilidad de la presa en sí.

En resumen, la energía hidroeléctrica está muy explotada y, aunque sea la más versátil y fiable de las fuentes de energía renovable, no va a servir para ayudarnos en la transición energética ni, en particular, en el proceso de desaparición del petróleo y del resto de los combustibles fósiles. Por eso raramente se la menciona en los planes de descarbonización de nuestra sociedad, a pesar de que sin duda vaya a tener un papel muy relevante en ellos.

11POR QUÉ NO TODO SE PUEDE ALIMENTAR CON ENERGÍA EÓLICA

Durante las últimas tres décadas, la energía eólica ha experimentado un despegue sin precedentes: de ser un tipo de energía residual, usada fundamentalmente de manera mecánica (por ejemplo, en los sistemas de drenaje de las presas de contención del mar en los Países Bajos) y de manera testimonial en la producción de electricidad (por ejemplo, en Dinamarca), ha multiplicado exponencialmente su presencia hasta representar, en la actualidad, el 1% de toda la energía primaria que se produce en el mundo. Aun así, un 1% es un porcentaje muy escaso y, si tenemos en cuenta las diversas limitaciones de la energía eólica, es muy probable que nunca sobrepase el umbral del 5 o del 6% del actual consumo de energía primaria.

La primera cosa que debe considerarse es que, cuando se habla del potencial eólico, se esté pensando solamente en la generación de electricidad por medio de aerogeneradores. Esta observación es importante porque, por un lado, la electricidad no puede cubrir todas las necesidades energéticas de nuestra civilización (como ya hemos comentado en varias ocasiones) y, por otro, porque la energía eólica también se podría aprovechar de manera no eléctrica (aspecto al que volveremos más adelante).

Comencemos con la discusión sobre el potencial máximo de la energía eólica de la Tierra, siempre desde el punto de vista de la generación eléctrica. Existen multitud de estudios que han calculado este potencial y, en su mayoría, ofrecen valores para la máxima capacidad de generación de energía eléctrica de origen eólico muy por encima del consumo total de energía actual en la Tierra. Sin embargo, todos los estudios que ofrecen valores muy abultados de la posible producción eólica futura están calculados bajo hipótesis que violan principios físicos fundamentales, tales como la conservación de la energía y del momento mecánico. Dichos estudios se basan en la mera adición aritmética de la energía de cada

aerogenerador, sin tener en cuenta que, cuando se habla de introducir millones de generadores, inevitablemente interfieren unos con otros, sobre todo porque, a medida que unos generadores extraen energía del viento, va quedando menos energía disponible para el resto. El Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid ha hecho diversos análisis del potencial eólico del planeta Tierra para considerar cuánta energía disponible hay en la capa límite de la atmósfera, es decir, en los primeros doscientos metros desde la superficie de la Tierra, que sea accesible a los aerogeneradores. La conclusión del GEEDS en un estudio de 2012 fue que, como mucho, se puede extraer el equivalente al 6% de la energía primaria consumida hoy en día por medio de los aerogeneradores. En su momento, este estudio causó mucha polémica por ser el primero en mostrar que el potencial eólico era muy inferior al consumo de energía total y, sobre todo, porque la crítica a la falta de sentido físico de los estudios previos era completamente cierta hasta el punto de invalidarlos (incluso uno del que esto escribe). Con posterioridad, se han publicado estudios que incorporaban ese principio de interferencia entre los aerogeneradores y, aunque fueran bastante optimistas, suponían ya una rebaja más que considerable con respecto a los valores que se ofrecían antes del trabajo del GEEDS. El problema con esos nuevos estudios es que, una vez más, no tenían en cuenta otros principios físicos importantes e inevitables que ya se habían introducido en el trabajo inicial de Valladolid. El propio GEEDS publicó más tarde una revisión exhaustiva de su análisis en el que incluso rebajaba ligeramente el potencial eólico con respecto a su primer trabajo. En paralelo, un estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) dio la razón al GEEDS al mostrar que la ubicación masiva de aerogeneradores podría causar una desviación más que notable de la circulación general de la atmósfera, de manera que habría unos límites con respecto a la máxima densidad de aerogeneradores en una zona, so pena de producir un *efecto bosque* (en donde el viento prefiere rodear el bosque por los lados y por encima a atravesarlo porque la obstrucción que generan los árboles acaba siendo, de manera efectiva, una barrera). La cuestión sobre el potencial eólico máximo de la Tierra constituye aún hoy un debate abierto, pero, si valoramos los estudios con criterios de calidad científica, la balanza parece decantarse más hacia las perspectivas pesimistas, las cuales

indican que solo se puede cubrir una fracción mínima con energía eólica, que hacia las optimistas.

El potencial máximo de generación eólica constituye solo uno de los factores restrictivos para la expansión eólica. Hay otro problema muy importante, a saber: la dependencia intensa de los combustibles fósiles requerida para su despliegue y operación. Un aerogenerador representativo de los que se han desplegado durante los últimos años, el típico aerogenerador de un megavatio (MW), consta de un mástil de cuarenta metros de altura y tres aspas de veinte metros de longitud. El mástil es una estructura casi cilíndrica de hormigón armado apoyada sobre unos cimientos amplios que se adentran varios metros, también de hormigón armado. Aparte de la cantidad de combustibles fósiles requerida para fabricar el cemento y el acero, se consume una gran partida de estos en los camiones que se usan para transportarlos hasta el lugar de instalación, en las excavadoras que allanan el terreno y excavan los cimientos, en las hormigoneras donde va el cemento y en las grúas que se requieren para subir las estructuras y bombear el cemento. Una vez instalados, las reparaciones son también muy costosas en combustibles fósiles por el uso de grúas y, en ocasiones, helicópteros, por ejemplo, para reparar un aspa rota. Si contabilizamos toda la huella de CO_2, las emisiones totales de CO_2 de un aerogenerador por unidad de energía producida siguen siendo mucho menores que las de una central térmica de gas natural, e incomparablemente inferiores a las de una térmica de carbón, pero eso no evita el hecho de que tengan igualmente una enorme dependencia de los combustibles fósiles y que su despliegue se pueda ver comprometido por el inevitable declive de la producción de petróleo, carbón y gas natural durante los próximos años. El impacto de la escasez de combustibles fósiles por venir es raramente tenido en cuenta cuando se diseña la transición a un futuro cien por cien renovable y puede suponer un obstáculo mayor para que tal transición ocurra. Además, hay que tener en cuenta que, como cualquier otra instalación, un parque eólico posee una vida útil, superada la cual resulta imposible mantenerlo en funcionamiento porque las reparaciones acaban siendo más costosas que construir un parque nuevo desde cero. El coste energético y, en particular, de energías fósiles del desmantelamiento de los parques eólicos también es raramente considerado. Añádase a ello que, en un futuro no tan lejano, quizá a treinta o cuarenta años vista, cuando haya que desplegar los nuevos sistemas renovables que

sustituyan a los actuales, la escasez de combustibles fósiles podría convertir ese despliegue en un imposible debido a la escala que tienen los modernos aerogeneradores. Desplegar estructuras a cuarenta metros de altura de un modesto generador de un MW ya no digamos a doscientos metros de uno de cinco MW, puede ser una tarea inviable sin el soporte de una gran abundancia de combustibles fósiles, algo que el futuro no parece tenernos reservado.

Si estos problemas son importantes para la energía eólica terrestre, lo son aún más para la eólica marina. Debido a la ausencia de relieve topográfico del mar, el viento sopla ininterrumpido por largos kilómetros y de una manera mucho más constante que sobre el continente. De ahí que la cantidad de energía que puede ser captada por un parque eólico marino sea mucho mayor que la que ofrece uno terrestre. Sin embargo, los costes de despliegue y mantenimiento resultan también mucho mayores, en una lucha constante contra la corrosión y las tempestades marinas. Puestos ambos factores en una balanza, los parques eólicos marinos no parecen ofrecer un mejor rendimiento que los terrestres, y su desmantelamiento es muchísimo más complejo y genera mayores peligros, por ejemplo, para la navegación.

En resumen, la energía máxima que se puede llegar a producir al instalar parques eólicos probablemente se halle limitada a un valor máximo que está muy por debajo de nuestro consumo de energía actual. Además, se orienta a la producción de electricidad, que no es el tipo de energía que más necesitamos, precisamente. Por último, requiere de grandes cantidades de energía fósil, la cual va a ir escaseando en las próximas décadas, lo que compromete la viabilidad de esta fuente. Debemos, por tanto, buscar otra alternativa.

12POR QUÉ NO INSTALAREMOS MILLONES DE PANELES SOLARES

Cuando se habla hoy en día del aprovechamiento de la energía solar, el sistema que copa casi toda la atención es el de las placas fotovoltaicas. Se trata de un producto de alta tecnología que cuenta, además, con un aspecto bastante atractivo. Las placas fotovoltaicas son limpias, pulidas y no generan ningún residuo visible. Simplemente están ahí y nos proporcionan la energía que queremos, sin mayor coste aparente. Su impacto ambiental *in situ* es muy moderado: tampoco parecen peligrosas para los pájaros, como los aerogeneradores, ni alteran la vida de personas, ecosistemas e incluso el clima local como sí lo hacen las presas hidroeléctricas. Tienen ese aspecto de las (mal llamadas) nuevas tecnologías: perfectas, pulidas, eficientes, sin partes móviles. Muy *techie*. Muy *cool*. Además, es frecuente encontrar artículos en los diarios en los que se nos recuerda que el coste por kilovatio instalado ha decrecido de manera consistente durante las últimas décadas, así que ahora cuesta diez veces menos de lo que costaba veinte años atrás. Se habla de que el rápido progreso tecnológico ha hecho que los «costes nivelados de la electricidad fotovoltaica» ya estén en paridad con los de las centrales térmicas, de que, cubriendo una mínima parte de la superficie del planeta, podremos abastecer más que de sobra las necesidades actuales de la humanidad o de que, gracias a las instalaciones domésticas de paneles fotovoltaicos, se democratiza el acceso a la energía. Todo cuanto rodea a la energía fotovoltaica parece enormemente positivo y, si esta fuente de energía no acaba de despegar, debe de ser, al decir de algunos, por culpa de las conspiraciones de las petroleras y del monopolio eléctrico. Pero lo que sucede es que la realidad de la energía fotovoltaica es mucho más prosaica y sus perspectivas, menos halagüeñas de lo que cuentan sus valedores.

La energía solar para la producción de electricidad en su conjunto (no solo la fotovoltaica) representa, en la actualidad, menos del 0,5 % del total de la energía primaria consumida en el mundo. Es cierto que, durante las dos últimas décadas, esta fuente de energía ha experimentado incrementos

porcentuales anuales de dos dígitos, pero, cuando se tiene poco, es muy fácil apreciar grandes crecimientos relativos, si bien es verdad que, en los últimos años, se está observando un cierto frenazo en el número de nuevas instalaciones solares en todo el globo (sigue aumentando, pero ya no tan deprisa). China, por ejemplo, que instalaba cada año más de la mitad de las nuevas centrales solares del mundo, decidió en junio de 2018 detener por completo el despliegue de nuevas instalaciones y, a finales de 2019, volvió a poner en marcha nuevos proyectos de centrales térmicas de carbón, a pesar de los muchos inconvenientes que estas presentan, simplemente por ser económicamente más competitivas que las centrales solares. Un fenómeno semejante se ha vivido en Italia, Alemania y en España, aunque en nuestro país 2019 haya visto un *boom* de nuevos proyectos debido sobre todo a cambios legislativos, un despegue que previsiblemente acabará de mala manera porque España se halla sobreabastecida desde el punto de vista eléctrico.

Y es que, al igual que las otras fuentes de energía renovables que ya hemos comentado (hidroeléctrica y eólica), junto con la energía nuclear, la energía solar, con los sistemas fotovoltaicos a la cabeza, se está orientando a la producción de electricidad, sin tener en cuenta que no es precisamente electricidad lo que más necesitamos. Esta fijación por la producción eléctrica condena a los sistemas de aprovechamiento solar a su irrelevancia en la transición energética que debemos emprender sin falta. En lo que resta del capítulo, me centraré en los sistemas fotovoltaicos y diferiré el análisis de otros sistemas solares a capítulos ulteriores, donde me ocuparé de su abordaje.

Además de la saturación eléctrica, hay muchas otras limitaciones que aquejan a los sistemas fotovoltaicos. El primero que conviene tener en cuenta es que el potencial máximo fotovoltaico probablemente sea muy inferior al que, en general, se estima. Debido a que la energía que nos llega del Sol es casi diez mil veces superior a la energía que consume la humanidad procedente de todas las fuentes que estamos explotando (no renovables y renovables), resulta tentador pensar que la abundancia de energía solar a nuestro alcance hace irrelevante cualquier limitación que se quiera discutir. Es fácil encontrar estudios que nos muestran que con menos del 1% de la superficie de la Tierra cubierta de placas fotovoltaicas abasteceríamos todas nuestras necesidades energéticas actuales. Pasando

por alto la cuestión de la saturación eléctrica, esos cálculos pecan de un simplismo excesivo a la hora de calcular el verdadero potencial técnico fotovoltaico. Habría que recordar que el 80 % del flujo electromagnético proveniente del Sol que llega a la Tierra no se puede aprovechar: o llega con demasiado ángulo o se refleja en la atmósfera o, directamente, en la superficie planetaria. Además, la superficie de la Tierra está cubierta, en sus tres cuartas partes, por mares y océanos, donde no es verosímil construir parques fotovoltaicos, como tampoco lo es hacerlo en los desiertos o en las zonas montañosas. Si a esto se añaden otros factores, como cuál es la insolación media de una zona (donde intervienen la latitud y la frecuencia de la cobertura por nubes), la orografía, etcétera, uno se encuentra con que el potencial máximo explotable por sistemas fotovoltaicos es mucho menor de lo que esperan los defensores de esta opción. En España, un estudio del mencionado GEEDS de Valladolid, que se sirvió de la misma metodología que usaron en el caso eólico, mostró que el potencial máximo fotovoltaico de la Tierra podría corresponderse con aproximadamente el 25 % de nuestro consumo vigente global de energía primaria. Una cantidad sin duda muy grande, pero insuficiente si lo que se está intentando hacer es una sustitución completa del actual consumo de energía no renovable (recordemos que el petróleo, el carbón, el gas natural y el uranio representan hoy en día el 90 % de todo el consumo global de energía primaria). De nuevo, este estudio cayó como un mazazo en el sector y causó también una gran polémica, aunque en el caso de la energía fotovoltaica se abriera un frente nuevo de crítica que empeoraba el estado de cosas. En 2013, tras varios años de elaboración, el ingeniero Pedro Prieto y el profesor Charles Hall publicaron un libro (*Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment*) donde analizaban con gran nivel de detalle el rendimiento energético de un gran número de plantas de producción de electricidad fotovoltaica situadas, precisamente, en España, más en concreto, entre Extremadura y Andalucía. Se trataba de un estudio bien respaldado: Pedro Prieto, vicepresidente de la Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos, es una persona con años de experiencia en el sector y, de hecho, copropietario de algunas plantas fotovoltaicas, mientras que Charles Hall es una eminencia mundial en la aproximación ecosistémica al metabolismo energético mundial. El libro de Prieto y Hall mostraba de manera fehaciente que el rendimiento energético

de los huertos solares de placas fotovoltaicas, operados en condiciones reales de explotación, resulta demasiado pírrico para pensar en que se pueda mantener una sociedad industrial basada en este sistema. Cabe destacar que Prieto y Hall no afirman que no se produzca una ganancia neta de energía (al contrario de los biocombustibles o el hidrógeno, donde realmente se pierde energía en su generación). De hecho, ellos estiman que, durante toda la vida útil de una planta fotovoltaica, por cada unidad de energía que se invierte en un huerto solar, se gana algo menos de tres unidades de energía. Eso puede parecer mucho (una ganancia del 200%), pero se reparte sobre un período muy amplio de tiempo (unos treinta años), lo cual equivaldría a una tasa porcentual anualizada promedio del 3,3%. Cuando ese rendimiento energético se traslada al rendimiento económico (pues hay otros costes más que los energéticos), este se queda en un magro 1 o 1,5% anual, lo cual explica el escaso interés económico de invertir en placas fotovoltaicas. Pero el problema es mucho peor: los estudios de Hall a lo largo de su carrera investigadora han mostrado que las fuentes de energía de una sociedad estructurada precisan tener un rendimiento energético elevado, al menos de cinco unidades retornadas por cada unidad invertida y, probablemente, hasta las diez unidades, so pena de que algunas funciones (como la educación, la sanidad o las infraestructuras) colapsen. El estudio de Prieto y Hall fue duramente criticado y repetidamente denostado, pero lo cierto es que hoy nadie ha podido refutar desde postulados científicos sus conclusiones, por lo que estas deberían tomarse muy en serio en cualquier discusión sobre la viabilidad de la energía fotovoltaica. Un aspecto importante del estudio de Prieto y Hall es que mostró que el coste energético de los propios módulos fotovoltaicos representa solo un tercio del total, y que los dos tercios restantes quedan asociados a todas las otras instalaciones de soporte y de mantenimiento requeridas; por tanto, una disminución del coste de las placas fotovoltaicas o una mejora de su eficiencia no va a conseguir nunca elevar el rendimiento energético de los huertos solares por encima de las cuatro unidades de energía retornada por cada unidad invertida, lo cual resulta insuficiente para mantener una sociedad estructurada. Otra cuestión que destacar es que instalaciones domésticas en viviendas unifamiliares con entornos adecuados (correcta orientación de los módulos, sin sombra de otros edificios circundantes) pueden llegar a conseguir rendimientos energéticos de cinco a uno o ligeramente superiores. Sin embargo, la

cantidad total de energía que se puede producir con esas instalaciones domésticas es muy limitada, y el mantenimiento de una sociedad industrial requiere instalaciones de mucha mayor entidad.

Otro aspecto oscuro (nunca mejor dicho) es la razón real detrás del vigente abaratamiento de los paneles fotovoltaicos. Por una parte, es verdad que ha habido cierto progreso tecnológico en los procesos de fabricación, pero el factor que más ha influido para abaratar los precios ha sido el acaparamiento del mercado por China. Efectivamente, la mayoría de los productores de paneles fotovoltaicos occidentales ha quebrado, incapaces de competir con los bajos precios que han impuesto los fabricantes chinos. Este bajo precio viene determinado por factores geopolíticos (bajo precio del yuan), pero también sociales (salarios bajos) y ambientales (uso intensivo del carbón como principal fuente de energía en China). Los paneles chinos son baratos, también, porque tienen una huella de carbono mucho más elevada que su contraparte occidental, a la que se añade tanto el masivo uso del carbón en China como fuente de energía primaria como el elevado coste ambiental del transporte en cargueros de los paneles chinos desde la otra punta del mundo. Que China se haya convertido prácticamente en un monopolio en la fabricación de paneles fotovoltaicos es, además, peligroso para garantizar su continuidad y, en particular, en un mundo en declive energético por la superación de los diversos picos de producción de los combustibles fósiles. Está en peligro, pues, no solo la fabricación de nuevos paneles, sino la de los materiales necesarios para su reparación y mantenimiento: en no pocos casos, la empresa que fabricó los paneles desaparece a los cinco o diez años de haberlos vendido y, cuando se necesitan repuestos, no se pueden encontrar porque el fabricante ya no existe.

Hablando también del impacto ambiental de los paneles, un estudio de 2015 («Impact of solar panels on global climate», *Nature Climate Change*) apuntaba que la instalación masiva de paneles fotovoltaicos puede crear un calentamiento local significativo y, si uno llevaba la instalación de paneles fotovoltaicos a los millones requeridos para hacer la transición energética, se podría elevar la temperatura localmente entre 1 º y 1,5 ºC, con efectos semejantes —aunque de menor escala geográfica— a los que se quieren prevenir con la instalación de los susodichos paneles.

Un problema adicional en la fabricación de paneles fotovoltaicos es que se requieren instalaciones de alta tecnología. El grado de pureza de las obleas de silicio es muy alto, de una parte por cada diez mil, y eso precisa instalaciones especiales donde se garantice la limpieza extrema (salas blancas). Esto no solo encarece la fabricación, sino que vuelve esta tecnología menos asequible ante un futuro menos tecnológico, donde los procesos de fabricación habrán de ser mucho más sencillos.

Por último, la fabricación de paneles fotovoltaicos requiere materiales escasos. Particularmente preocupante es el problema de la plata, cuya escasez no solo afecta a los paneles fotovoltaicos, sino también a los componentes electrónicos que se usan en dispositivos móviles, ordenadores, etcétera. La plata es necesaria para las conexiones con las células de silicio, que deben tener una sección muy pequeña y una resistencia eléctrica baja para evitar afectar al rendimiento de la placa. Por tanto, se tiene que usar un material muy conductor y, al mismo tiempo, maleable, y justamente es la plata el material que posee ambas características. Se han realizado experiencias prometedoras sustituyendo la plata de las conexiones, pero las placas resultantes tenían una vida útil bastante breve. La escasez de plata (este metal precioso podría quedar completamente agotado en un par de décadas, antes si se acelera su uso por sus aplicaciones electrónicas) es uno de los grandes factores restrictivos de la tecnología fotovoltaica.

En resumen, se suele considerar que el potencial renovable solar es enorme porque la energía que nos llega del Sol es ciertamente colosal. Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos tienen muchas más limitaciones de lo que en general se admite: su potencial técnico máximo resulta insuficiente para cubrir la demanda actual de energía, su rendimiento energético es demasiado bajo para mantener una sociedad de ciudadanos libres, sus impactos ambientales son mayores de lo esperado y, además, dicha sociedad se ve afectada por la escasez de ciertos materiales, en particular, la plata. Posiblemente, de entre todas las energías renovables, sea la tecnología con más problemas y peor rendimiento. No hay, pues, un gran futuro esperando a la energía fotovoltaica.

13POR QUÉ NO PODREMOS MANTENERNOS SOLO CON ENERGÍAS RENOVABLES

Tras la revisión de los principales sistemas de captación de energía renovable hecha en los capítulos anteriores, el lector habrá observado que quedan aún algunos sistemas renovables por mencionar. Los más conocidos son los basados en la energía geotérmica, la energía mareomotriz, la energía undimotriz y algunas variantes de la energía solar, como la solar de concentración. Con respecto a los tres primeros, poca cosa cabe decir: son sistemas que trabajan con formas de energía renovable que tienen una capacidad de producción muy modesta comparada con la proporción ingente de energía que se consume en la actualidad. La geotermia *de baja entalpía* puede ser usada en la mayoría de los lugares, pero sirve para poco más que una ayuda en la climatización, mientras que la *de alta entalpía* solo se puede aprovechar en áreas de alto potencial geotérmico (zonas volcánicas), que son escasas en la Tierra. La energía mareomotriz (de las mareas) solo es aprovechable en determinadas áreas estuarias donde la fuerza de la marea genera un flujo de agua entrante que se puede aprovechar en una especie de presa inversa. Y la undimotriz (de las olas) es de escaso rendimiento y necesita instalaciones muy vastas para una magra cosecha en un medio tan agresivo como es el mar. La única energía renovable que merece un poco más de análisis es la solar de concentración, que se basa en concentrar la energía del Sol en un único punto usando espejos. En ese punto se alcanzan altas temperaturas que pueden ser usadas para producir vapor y mover una turbina (sistema menos eficiente) o con un motor Stirling (más lento, pero mucho más eficaz) o, incluso, se pueden usar sales fundidas para acumular el calor y así conseguir una generación energética menos intermitente que con la fotovoltaica. La energía solar de concentración, además, no requiere una alta tecnología ni tampoco echar mano de materiales escasos. Sin embargo, se trata de una instalación de gran envergadura que, al final, proporciona una cantidad de energía por metro cuadrado de ocupación que no es mejor que la fotovoltaica y es,

además, más propensa a sufrir las inclemencias del tiempo. Asimismo, los materiales sufren mucho desgaste debido a las altas temperaturas y, al cabo, su rendimiento resulta también bastante mediocre, aunque falten datos de campo por haber pocas plantas que usen esta tecnología a escala mundial.

Aun cuando parezca increíble, quedan muchas otras formas de energía más o menos renovable bastante exóticas que no hemos considerado todavía: la asociada al potencial geomagnético de la Tierra (se aprovecharía al desplegar una cometa gigante a gran altura para inducir una corriente eléctrica debido a la variación del campo magnético terrestre), la potencial gravitatoria de las rocas (básicamente, consiste en dejar caer grandes peñascos, aunque no esté claro si es muy renovable y su aprovechamiento se antoja dificultoso), la electrolítica de las raíces de las plantas o de ciertas bacterias, los rayos, las tormentas solares, la evapotranspiración… De vez en cuando, en los suplementos de ciencia nos podemos encontrar con curiosidades científicas que nos hablan de estas supuestas maravillas por llegar y que en ningún caso acaban yendo más allá de los ensayos de laboratorio. Muchas de ellas no son realmente nuevas, sino que son viejas conocidas que cada cinco o diez años vuelven a aparecer en los periódicos. La realidad es que, a estas alturas, conocemos muy bien los principales flujos de energía y de materia en el planeta, los que mueven el 99,99 % de esos flujos: la ciencia que los describe está consolidada desde hace décadas e incluye diversas ramas de la biología y las geociencias, incluidas la ecología, la meteorología, la biogeoquímica, la oceanografía física, la geología, etcétera. Por tanto, no existen otras fuentes de energía renovable disponibles ni ningún hallazgo científico las va a poner sobre la mesa, porque para ello debería faltarnos algún término en un balance energético que, hoy en día, conocemos muy bien. Simplemente, no hay nada más.

14POR QUÉ NO FUNCIONAN EL AHORRO Y LA EFICIENCIA

A finales del siglo XIX, el economista inglés lord William Stanley Jevons hizo una curiosa observación. En aquellos tiempos, la Primera Revolución Industrial había triunfado de manera indiscutible y proliferaban a buen ritmo las máquinas de vapor, a las cuales se les iban encontrando cada vez más usos industriales y sociales. La tecnología progresaba imparable, mientras que las máquinas de vapor incrementaban su eficiencia cada año, de modo que se podía obtener más trabajo útil usando menos carbón. Ese aumento de la eficiencia, razonaba Jevons, debería haber conducido a una disminución en el consumo de carbón en Inglaterra. Sin embargo, a medida que la eficiencia de las máquinas crecía, las estadísticas nacionales inglesas mostraban cómo la cantidad total de carbón que se consumía aumentaba en vez de disminuir. Es lo que se conoce como la *paradoja de Jevons*.

Hoy en día este fenómeno es bien conocido y comprendido, y es una variante específica de un efecto más general conocido como *efecto rebote*: cuando un recurso se puede explotar de una manera más eficiente, se usa en mayor medida y no al revés. Eso es debido a que el aumento de eficiencia posibilita usos que antes no eran considerados. Por ejemplo, con las máquinas de vapor: primero se construyeron sistemas de bombeo para ayudar a achicar el agua en las minas de carbón; después, al mejorar la eficiencia y hacer las calderas lo suficientemente pequeñas para poder embarcarlas en una locomotora, se construyeron los primeros trenes y las máquinas de vapor se usaron para viajar y transportar materiales. Más adelante, al mejorar la eficiencia de nuevo y poder reducir aún más el tamaño de las calderas, se empezó a fabricar todo tipo de maquinaria industrial, comenzando por la industria textil, y, de ese modo, aumentó la producción industrial, y así sucesivamente. Ese mismo efecto se obtiene con cualquier otro uso de materiales o de energía: cuanto más eficiente se es, más se usa, porque se introducen nuevas aplicaciones.

En el caso de la energía, además, hay una consideración muy importante que implica no solo que la eficiencia resulta inútil, sino que también lo es el

ahorro, en tanto que no se modifique nuestro sistema económico y productivo. La energía es la capacidad de llevar a cabo un trabajo útil: al usar energía, podemos fabricar cosas y prestar servicios. Por tanto, la energía posee un valor económico, porque lo que añade valor económico a la materia prima menos elaborada es precisamente el trabajo. Un trozo de mineral de hierro no tiene gran valor, pero, si lo transformamos adecuadamente, usando energía, en una plancha de metal, se revalorizará. Si esa plancha la utilizamos luego para fabricar un coche, usando de nuevo mucha energía, entonces obtenemos un valor mayor si cabe. Es el trabajo el que crea el valor de las cosas. Por tanto, el uso de la energía tiene un valor económico primordial. La energía que no se use en algún sitio, bien sea porque se aumente la eficiencia, bien porque se decida simplemente ahorrar, será invertida en cualquier otra parte, porque siempre que se usa energía se genera valor y, por tanto, se puede ganar dinero. Por ese motivo, en un sistema económico como el nuestro, orientado a la maximización de beneficios y al incremento incesante de la producción y el consumo, nunca va a haber energía ociosa: siempre que haya energía disponible, alguien la aprovechará para producir algo y ganar dinero con ello.

Los economistas clásicos suelen considerar que los factores importantes en la generación de riqueza son el capital y el trabajo, contando este último como el trabajo que hacen los humanos, los trabajadores. Sin embargo, hace tiempo que se sabe que el factor que mayor peso tiene en la generación de riqueza es la energía, lo cual no es de extrañar si tenemos en cuenta que, de toda la energía que se usa en el trabajo, la parte endosomática (la que ejercemos con nuestros músculos) es minoritaria, mientras que la parte exosomática (de fuera de nuestro cuerpo) asciende al 95% del total. El economista Gaël Giraud, que ha analizado las estadísticas de producción y consumo de energía y materiales de las economías avanzadas, ha llegado a la conclusión de que, por cada punto porcentual que se incrementa el PIB de un país, el 60% corresponde simplemente a un aumento en el uso de la energía y aún un 10% corresponde a las mejoras de eficiencia en el uso de esa energía. Eso deja la contribución conjunta del capital y el trabajo en menos de la mitad de lo que aporta simplemente consumir más energía.

La fuerte asociación entre energía y PIB es tan clara que resulta habitual encontrar en los informes anuales de la Agencia Internacional de la Energía gráficos históricos que muestran cómo el desarrollo económico ha ido

parejo con un incremento en el consumo de energía. Desde la perspectiva de un economista clásico, si se aumenta la actividad económica, se incrementa el consumo de todo y, en particular, de la energía, porque para el economista clásico la energía es simplemente una materia prima más. Sin embargo, desde una perspectiva más sistémica (como, por ejemplo, la de los economistas ecológicos), la energía es el precursor de la actividad económica y la asociación debería leerse al revés: debido a la energía disponible, se puede incrementar la actividad económica. Lo cual también presenta una lectura negativa: si falta energía, forzosamente habrá una contracción económica. Esta parte negativa de la asociación entre energía y economía la analizó, con bastante detalle, el profesor James Hamilton, de la Universidad de California en San Diego. Estudiando las estadísticas econométricas de los Estados Unidos, el profesor Hamilton llegó a la conclusión de que, cada vez que el coste de la energía superaba el 10 % del PIB, su país entraba en recesión; de hecho, diez de las últimas once recesiones económicas podrían explicarse por ese motivo. A una conclusión similar llegó Robert Hirsch y la comisión que él presidió por mandato del presidente George Bush Jr. cuando analizaron la importancia de la producción de petróleo para la economía estadounidense y mundial: Hirsch encontró que, cada vez que se reducía la disponibilidad de petróleo, seis o nueve meses después se desencadenaba una grave crisis económica.

La importancia económica de la energía es lo que explica la paradoja de Jevons y también por qué todas las medidas políticas actuales dirigidas al ahorro de energía y a la mejora en la eficiencia de la maquinaria no son adecuadas. Como hemos dicho, si queremos hacer crecer el PIB, necesitamos que aumente primero la disponibilidad de energía. Y si, por la razón que sea, esta disponibilidad de energía mengua, el PIB forzosamente decrecerá y entraremos en recesión. Sin energía, no hay trabajo útil, y sin trabajo útil, no hay actividad económica. Así pues, por más que ahorremos energía y mejoremos la eficiencia, lo único que conseguimos es que el valor económico de la actividad asociada sea más pequeño y, a menos que invirtamos esa energía sobrante en algún otro trabajo, obtendremos un descenso en la actividad económica y, por tanto, una crisis. Para un particular, está muy bien ahorrar energía o utilizar electrodomésticos y máquinas más eficientes, porque eso va a disminuir su factura personal,

pero, en el conjunto de la sociedad, esa energía no usada se tiene que poner a trabajar o, si no, decrecerá el PIB.

Esta incomprensión del nexo que existe entre energía y economía es lo que hace que las políticas públicas sobre energía estén tan mal guiadas. Si se desea realmente reducir el consumo de energía, no basta solo con que se produzca una disminución del gasto energético en los hogares y en los negocios, sino que, además, deberían adoptarse otras medidas legislativas para que la energía excedentaria no se destinara a otros usos. Ahora bien, esas medidas legislativas adicionales implicarían una restricción de la actividad económica. Es decir, se estaría impidiendo el acceso libre a la energía sabiendo que eso implica que determinadas actividades económicas no se podrían llevar a cabo a partir de entonces. En suma: se estaría imponiendo un racionamiento.

El coste político de tomar medidas de racionamiento para limitar el consumo de energía (y también de materiales) resulta extremadamente elevado, puesto que tales medidas contradicen la esencia misma de la economía de mercado y del capitalismo, que son los puntales económicos de nuestra sociedad. Ningún gobierno occidental se plantea seriamente tomar medidas de racionamiento porque es consciente no solo de su enorme impopularidad, sino de las devastadoras consecuencias económicas que eso tendría. Por tanto, se pone el acento en la mitad de la ecuación (el ahorro y la eficiencia), sin acompañarla de la segunda parte necesaria (el racionamiento). El ahorro y la eficiencia bajo un régimen de racionamiento son medidas útiles, pues permiten aprovechar mejor lo que queda disponible, sobre todo de cara a garantizar unas condiciones de vida dignas para la mayoría de la población y la posibilidad de mantener negocios (aunque sin perspectivas de expansión, siempre estacionarios). Pero el ahorro y la eficiencia al margen del racionamiento no tienen ningún efecto: tan solo cambian de sitio dónde se consume la energía, sin ningún resultado realmente útil.

Que el ahorro y la eficiencia junto con el racionamiento sean las dos caras de la moneda de la sostenibilidad no es algo desconocido en el ámbito político, pero el coste político de asumirlo resulta excesivamente elevado, y por eso se enseña una cara y se esconde la otra. Esta es la razón por la que no se hace nada efectivo en la lucha contra el cambio climático: porque hacer lo que se debe implicaría reducir la actividad económica, y nadie está

dispuesto a eso. De ahí que estemos permitiendo que el clima del planeta continúe degradándose sin hacer nada.

Sin embargo, la llegada de la producción de los combustibles fósiles a su cénit y la manifiesta incapacidad de los sistemas de generación de energía renovable por cubrir completamente el agujero que deja tras de sí el retroceso de los combustibles fósiles van a imponernos una situación de racionamiento forzoso. No vamos a disminuir nuestro consumo de energía porque queramos, sino simplemente porque la cantidad de energía disponible cada año va a ser menor. Tampoco vamos a quedarnos sin energía de golpe ni el descenso va a ser vertiginoso (probablemente, se extienda durante unas décadas), pero sí que está garantizado que cada año obtendremos menor cantidad, y eso va a impedir que crezcamos desde prácticamente ya. Y en nuestro sistema económico, si no crecemos, tenemos un problema. Uno grave.

Así que no dejemos el ahorro y la eficiencia en el cajón de las soluciones inútiles, porque realmente sí que sirven y servirán a partir del momento en que empiece el racionamiento. Claro que su asunción nos va a imponer algo aún más drástico si cabe: el fin del capitalismo.

15POR QUÉ NO EXISTE UN MOTOR DE AGUA

A finales de la década de 1960, un ingeniero llamado Arturo Estévez Varela dio una vuelta por media España montado en su moto, la cual funcionaba con un motor de su invención basado en un combustible completamente inusual: el agua. En cada pueblo donde paraba, Arturo echaba un trago de agua de un botijo, echaba el resto del agua en el depósito de su moto y, ¡oh, prodigio!, la moto arrancaba. ¡Un motor que funcionaba con agua! Era la revolución energética esperada: un motor capaz de funcionar con un combustible barato y abundante, que nos iba a liberar por fin de la dependencia de los países árabes. Habíamos llegado a Jauja.

Han pasado cincuenta años desde las teatrales representaciones del ingeniero Estévez y no se ha vuelto a saber nada más de su invención. Tras un interés inicial del propio general Franco por el motor de agua, diversos catedráticos e ingenieros, a petición del Gobierno de España, evaluaron el invento y llegaron a la conclusión de que Estévez añadía boro al agua para generar hidrógeno, y era este hidrógeno el que realmente quemaba su motor. No había, por tanto, ningún invento mágico, sino una simple y bien conocida reacción química y una manera cara de generar hidrógeno: el equivalente en energía a un depósito de gasolina convencional costaría varias decenas de miles de euros en boro. El propio Franco ordenó parar cualquier iniciativa sobre el motor de Estévez; «ya se ha hecho bastante el ridículo», se ve que dijo, y Estévez acabó procesado. Aún hoy es posible encontrar espíritus soñadores a los que les gusta fantasear con épicas conspiraciones y que imaginan que el invento fue silenciado por oscuros intereses, sin comprender que simplemente se trató de una estafa.

Por más atractiva que resulte la idea de un motor que funcione con agua, no tiene ningún sentido. El agua es resultado de una combustión muy potente, la del hidrógeno, que se combina con el oxígeno para formar agua. Se podría decir que el agua son las cenizas de una combustión, y, como es algo ya quemado (tras combinarse con el oxígeno), no es fácil *quemarlo más*, es decir, combinarlo con más oxígeno. Antes bien, el agua es una

sustancia muy estable en condiciones habituales y, justamente porque es difícil combinarla con más oxígeno, se usa por lo común para apagar el fuego, porque ya no puede *quemarse más*. Pretender que del agua se pueda extraer aún más energía química resulta bastante absurdo, porque el agua ya se encuentra en una situación de gran estabilidad química.

El agua, sin embargo, presenta ciertas características que la hacen muy útil como medio para favorecer otras reacciones químicas. Es líquida y débilmente polar, lo que la convierte en un disolvente de primer orden donde resulta fácil dispersar componentes químicos para hacer más fácil que reaccionen entre ellos. Además, como tiene una temperatura de evaporación relativamente baja, se puede usar para combinar reactivos y luego evaporarla para recoger los productos. Algunas sustancias químicas muy activas y con gran energía interna, como el boro que comentábamos más arriba o el flúor, se pueden hacer reaccionar con el agua para arrancarle algunos átomos de hidrógeno y luego ese hidrógeno resultante usarse como combustible. Se debe tener en cuenta que, en esos casos, el verdadero combustible no es el agua, sino la sustancia que se le añade, la cual cuenta verdaderamente con un gran potencial energético y que, de hecho, se podría hacer reaccionar con otras sustancias que no fueran agua. Esas sustancias químicas de gran potencial reactivo no suelen encontrarse de forma libre en la naturaleza, sino generalmente ya combinadas junto con otras. La energía que se consume para producirlas acaba excediendo con mucho a la que después se podrá conseguir. De ahí que estas sustancias no sean verdaderamente combustible.

En realidad, el único motor basado en el agua que tiene sentido son los motores que queman hidrógeno. Efectivamente, desde hace ya un par de décadas se viene insistiendo en que la economía del futuro podría basarse en el uso de hidrógeno como combustible de referencia de nuestra civilización, lo que Jeremy Rifkin acuñó con el término de *economía del hidrógeno*. Así pues, la economía del hidrógeno se basaría en la idea de utilizar la energía eléctrica generada por las energías renovables para producir hidrógeno mediante electrólisis (un proceso fisicoquímico a través del cual se hace pasar una corriente eléctrica a través de un recipiente lleno de agua que consigue separar el hidrógeno del oxígeno y ambos gases son recogidos en contenedores adecuados). Ese hidrógeno quedaría almacenado para ser usado como combustible, sobre todo por los vehículos.

La idea en sí no es mala: todo parecen ventajas. Por un lado, se guardarían los excedentes de la producción renovable cuando no hubiera tanto consumo de electricidad, lo que evitaría su desaprovechamiento. Además, como el contenido energético por kilogramo de hidrógeno es muy elevado, obtendríamos un combustible energéticamente denso y, por tanto, aplicable en máquinas con elevada autonomía desconectadas de la red. Encima, la quema de hidrógeno produce solamente agua, con lo que no es en absoluto contaminante y el agua se recicla por sí misma al integrarse en el ciclo del agua de la Tierra. Sin embargo, a pesar de estas grandes ventajas y de que se lleve décadas hablando de esto, la economía del hidrógeno no ha tenido ninguna implantación. Y no porque haya ninguna conspiración, sino porque el hidrógeno presenta muchas otras pegas que anulan las presuntas ventajas.

Comenzando por el principio, el hidrógeno no es una fuente de energía. No existen yacimientos de hidrógeno ni ningún lugar de donde podamos extraerlo puro. El hidrógeno precisa generarse mediante algún tipo de reacción física o química, y eso implica un coste energético que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, será siempre mayor que la energía que vayamos a poder aprovechar después de quemar ese hidrógeno. Por tanto, el uso de hidrógeno no resuelve en modo alguno la crisis energética, ya que no nos proporciona nuevas cantidades de energía. Más bien al contrario: para producir hidrógeno por hidrólisis perderemos entre un 25 y un 50% de la energía que luego nos dará su combustión (por este motivo, la mayoría del hidrógeno que se usa comercialmente hoy en día se obtiene mediante una reacción química a partir del gas natural). Aun así, el hidrógeno puede ser útil porque nos da un *vector energético*, es decir, una sustancia o sistema donde poder guardar la energía hasta que la usemos. Por tanto, si aprovecháramos los excedentes de la producción eléctrica renovable para obtener hidrógeno, estaríamos aprovechando una energía que, de otro modo, íbamos a perder. Además, dado que el hidrógeno es algo que pueden llevar los vehículos en su depósito, nos proporcionaría esa potencia y esa autonomía que no podemos conseguir con los vehículos eléctricos (en el capítulo 17 discutiremos sobre los vehículos eléctricos con más detalle).

Sin embargo, la idea de que los sistemas de producción eléctrica renovable nos vayan a dar excedentes es errónea, tal como discutimos en

los capítulos precedentes. Nos va a faltar energía, y usar hidrógeno implicaría aumentar las pérdidas energéticas, así que, si lo usáramos como vector energético, tendríamos que estar muy seguros de la aplicación. Por desgracia, el rendimiento *well to wheel*(del pozo a la rueda) del hidrógeno es muy malo: se estima que se aprovecha solo el 25% de toda la energía inicialmente usada en un vehículo con pila de hidrógeno, frente al 85% de un coche eléctrico.

Tampoco la densidad energética del hidrógeno es tan buena como se dice. A temperatura y presión ambiente, el hidrógeno es un gas y, por tanto, es más difícil de manipular que un líquido. Para que un depósito contenga una cantidad de energía aceptable, el gas debería estar a una presión considerable. Pero, como la molécula de hidrógeno es muy pequeña (de hecho, es la más pequeña que existe), el hidrógeno es un elemento muy fugaz: incluso en depósitos de paredes densas y con buenos cierres en las cavidades, es normal sufrir pérdidas diarias de hidrógeno del 2% o más. Eso implica que el hidrógeno que se use deba producirse en un lapso de tiempo no muy dilatado, pero es que, además, eso sucede con un depósito de hidrógeno de paredes gruesas y que, por consiguiente, pesa mucho. De modo que, aun cuando el volumen y el peso fueran la mitad de los de una batería eléctrica con el mismo contenido energético, lo normal es que un vehículo de hidrógeno sea un híbrido, es decir, que queme combustible (hidrógeno, en este caso) en una célula de combustible para producir electricidad y que sea esa electricidad la que se use para mover el coche. Al tener una parte eléctrica, el vehículo de hidrógeno deberá contar también con una batería de cierta capacidad, lo cual contrarresta aún más las posibles ventajas en peso y volumen del depósito de hidrógeno. La razón por la cual el hidrógeno no se quema como hace en un motor de explosión (a la manera de la moto del ingeniero Estévez) es que los motores de explosión tienen un rendimiento muy bajo, de solo el 20% de la energía del combustible. Eso, cuando usas gasolina o diésel, que tienen una alta densidad energética, no te preocupa, pero, en el caso del hidrógeno, sí que sería importante, porque ya se ha perdido mucha energía en su transformación. Por tanto, se usan *células de combustible*, que ofrecen un alto aprovechamiento de la energía del combustible. El problema de las células de combustible es que las más eficaces requieren materiales raros y escasos, como el platino.

No se acaban aquí los problemas del hidrógeno. Debido a que es un gas altamente inflamable, con una llama tan potente que resulta invisible a la vista, eso implica tener una precaución especial con los depósitos de hidrógeno, especialmente cuando son de gran tamaño. Por otro lado, la contención y la conducción del hidrógeno no pueden hacerse con depósitos y conductos usados, por ejemplo, para el gas natural, ya que el hidrógeno es capaz de formar hidruros que corroen todo lo que esté fabricado con acero convencional. Por tanto, para poder usar gasoductos y depósitos de gas habría que someterlos a un tratamiento de recubrimiento interno con un polímero (irónicamente, derivado del petróleo), y cualquier brecha en el recubrimiento dejaría expuesto el acero a la corrosión.

En resumen, no existen motores que funcionen con agua pura, ya que, desde el punto de vista termodinámico, es una cosa absurda: es como pretender que un motor funcione quemando ceniza. Sí que existe la tecnología para aprovechar el hidrógeno, que puede obtenerse a partir del agua por reacciones físicas o químicas, pero siempre se pierde energía en el proceso. Eso solo tendría sentido en el caso de usar el hidrógeno como vector energético (una forma diferente de energía para poder aprovecharla después o en otro sitio), pero lo cierto es que el empleo del hidrógeno presenta muchos otros inconvenientes que lo hacen poco versátil, excepto para usos muy concretos y que estén muy bien planificados.

16POR QUÉ NO HAY ENERGÍAS LIBRES

Si una cosa nos ha traído el siglo XXI es la sensación de crisis sistémica, de degradación continua y permanente de nuestras condiciones de vida y sin que se produzca la necesaria reacción, el cambio de rumbo que precisamos. Para una buena parte de la población, esto ha supuesto un fuerte desengaño con respecto al sistema, sobre todo en relación con su capacidad de dar una respuesta real y eficaz a los problemas de la ciudadanía. Los ciudadanos pierden la fe en que los poderosos vayan a arreglar los problemas del mundo o siquiera que el mundo les preocupe lo más mínimo. Peor aún: se ha instalado un sentimiento de profunda desconfianza, de recelo general, ante las motivaciones reales de la clase dirigente y la élite.

Esa desconfianza es terreno abonado para la proliferación de supercherías y de estafas. Menudean los charlatanes que, como en aquel Lejano Oeste americano, ofrecían aceite de serpiente para curar todos los males. Abunda la pseudociencia, aprovechada hábilmente por individuos con pocos escrúpulos que venden caros remedios a enfermedades difíciles de curar o que propagan bulos abyectos contra las vacunas y, en general, contra todo aquello que suene a ciencia oficial. Y, como era de prever, el mundo de la energía no podía ser una excepción a este tardomilenarismo de pacotilla.

Una y otra vez nos encontramos con vídeos en internet colgados por individuos que, con escasos conocimientos científicos y poca preparación académica, son, sin embargo, capaces de resolver los grandes problemas energéticos de la humanidad con cuatro herramientas sencillas en el garaje de su casa. Estos corajudos inventores se saltan todo el procedimiento de validación científica que tantos éxitos ha cosechado desde su instauración, el método científico, y denuncian que son perseguidos por mafias de grandes empresas que quieren silenciarlos porque no quieren que se libere a la humanidad del yugo de las grandes compañías energéticas, y demás palabrería hueca, para luego pedir alguna donación a un número de cuenta o bien que les compren un kit para que cada cual pueda producir su propia *energía libre* en casa.

Tratar de desmontar todas las tonterías que se llegan a ver por internet sería algo muy pesado, además de bastante inútil, porque al día siguiente alguien puede inventarse una estafa distinta y tendríamos que volver a empezar. Así pues, en este capítulo describiré algunas características propias de estas patrañas con la esperanza de brindarle al lector suficientes pistas para que pueda desentrañar estos bulos cuando se los encuentre.

Antes de comenzar con la descripción de parte de estas patrañas, empezaré por explicar diversos conceptos básicos de física que nos serán útiles para desterrar, de plano, algunas de las tonterías con que uno se topa a veces.

En primer lugar, hablando de energía se debería tener siempre muy presentes los tres principios o leyes fundamentales de la termodinámica. La termodinámica es la rama de la física que se ocupa de las relaciones que hay entre la energía, la temperatura, el calor y el trabajo, conceptos que están todos ligados entre sí por ser diversas manifestaciones de la organización y propiedades físicas de la materia.

Así pues, el primer principio de la termodinámica establece que la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma. Esto es algo que todos hemos repetido como papagayos desde bien chicos, aunque haya poca gente que lo entienda. Al fin y al cabo, si la energía no se crea ni se destruye, ¿por qué necesitamos fuentes de energía? Por ejemplo, ¿la energía que hemos usado del petróleo no tiene que estar por ahí, de alguna manera? Y así es, en efecto: una parte de la energía se habrá usado para realizar el trabajo útil que queríamos hacer (mover el coche, transformar la materia) y otra se habrá disipado en forma de calor. A fin de cuentas, la temperatura es simplemente una medida del movimiento desordenado de las moléculas de un material: cuando algo está caliente es porque sus moléculas se mueven deprisa. Convertimos energía cinética macroscópica (a la escala que la podemos ver) en energía cinética microscópica (la de las moléculas que se mueven o vibran). Como en el mundo real hay fricción y rozamiento, cada vez que hacemos algo parte de la energía se pierde macroscópicamente (se transfiere como calor a las moléculas y los cuerpos se calientan) y por eso necesitamos nuevas fuentes de energía, para poder seguir haciendo las cosas. Lo que nunca puede suceder es que algo haga aumentar la energía macroscópica, así, sin más. Cuando alguien afirme que crea energía, no le haga caso: seguro que hay truco (como con el boro que el ingeniero Estévez

metía de tapadillo en su moto), seguro que la energía extra ha salido de algún sitio.

El segundo principio de la termodinámica afirma que siempre que intentemos aprovechar una fuente de energía para hacer algo, una parte de esa energía inevitablemente se perderá en forma de calor. Es decir, que, en vez de servir a nuestros propósitos, una parte de ella se dedicará a aumentar inútilmente la energía del movimiento de las moléculas de los objetos que estamos manipulando. El segundo principio es más preciso y nos permite calcular cuánta de esa energía se va a perder en forma de calor. Por ejemplo, la cantidad de energía disipada será tanto mayor cuanto más rápido queramos realizar la transformación (del mismo modo que gastaremos más gasolina para hacer un mismo trayecto si vamos a 120 km/h que si vamos a 60 km/h). El segundo principio también nos dice que si tenemos que transformar energía de un tipo a otro tipo diferente, tendremos que pagar un peaje, en forma de calor disipado, que será tanto mayor cuanto más diferentes sean los tipos de energía. Por ejemplo, si queremos aprovechar la fuerza del viento para mover las aspas de un molino que haga girar una rueda de moler, convertimos la energía cinética lineal del viento en energía cinética de rotación y la pérdida es muy pequeña. Sin embargo, si usamos el viento para generar electricidad en un aerogenerador con ayuda de un alternador que gira en un campo magnético autoinducido, una parte adicional de la energía se perderá en forma de emisión electromagnética de baja frecuencia al disiparse en el aire. En definitiva, cuando alguien afirme que ha inventado un procedimiento que transforma energía de dos tipos muy diferentes y sin pérdidas, desconfíe.

El tercer principio de la termodinámica afirma que la única manera de transformar perfectamente la energía en trabajo útil es a temperatura igual al cero absoluto. Es decir, a 273,13ºC bajo cero. Eso significa también que las cosas se deberían hacer con tal lentitud y parsimonia que se evitase por entero cualquier fricción o rozadura, cualquier pequeño choque, cualquier pequeña imperfección. De otro modo, algo de energía se disipará en forma de calor, de desorden de las moléculas. Lo que nos dice el tercer principio es que no puede haber, nunca, una eficiencia del cien por cien salvo en ese cero absoluto. Peor aún: si combinamos el segundo y el tercer principio, podemos saber cuál es la máxima eficiencia que se puede conseguir a una temperatura cualquiera. Por ejemplo, a temperatura ambiente, para

cualquier máquina. Cabe considerar que las eficiencias máximas siempre se sitúan bastante por debajo del cien por cien. Por tanto, cuando alguien nos diga que consigue una eficiencia del cien por cien en una máquina, sabremos que nos está mintiendo.

Los tres principios de la termodinámica se derivan de las observaciones repetidas en la naturaleza mediante el método científico y tienen una validez universal. No es una cosa opinable, sino una descripción objetiva de cómo funciona el mundo. Hoy en día, gracias a la mecánica estadística, hemos podido deducir estas tres leyes de la termodinámica a partir de nociones básicas sobre la física atómica y molecular y entendemos bien por qué nos marcan límites inexorables, que nunca se podrán rebasar. No son, por tanto, unas leyes de los hombres, que se puedan cumplir o infringir, sino unas Leyes con mayúsculas que simplemente nos obligan y se imponen de la misma manera que lo hacen las ecuaciones del electromagnetismo o la ley de la gravedad.

Otra cuestión básica que se debe comprender, en relación con la naturaleza atómica y molecular de la materia, es que la materia ordinaria es extraordinariamente estable. Resulta muy difícil, y requiere muchísima energía inicial, arrancar procesos que afecten al núcleo de los átomos. Uno no puede conseguir extraer energía nuclear modificando la materia con unos campos magnéticos caseros. Es una pretensión más o menos igual de ridícula que pretender desviar la Tierra de su curso lanzándole un guijarro. Que la materia sea tremendamente estable es algo que experimentamos en nuestro día a día, y una suerte: imagínense que con un simple cable eléctrico o un imán pudiéramos desencadenar, sin querer, una reacción termonuclear. Por eso mismo, no es sencillo conseguir fuentes de energía abundantes, si no son resultado de transformaciones químicas complejas en las que se haya invertido mucha energía en procesos muy persistentes (como, por ejemplo, la acción de la presión y la temperatura durante millones de años sobre los estratos de algas enterradas hasta convertirlas en petróleo). Y, por estas razones, las diversas máquinas que dicen ser capaces de conseguir la «fusión nuclear fría» no dejan de ser estafas más o menos elaboradas (como el infame Energy Catalyzer, el e-CAT).

Al margen ya de la física, una cuestión adicional que se suele argüir para explicar por qué tal o cual *sistema de energía libre* no se ha popularizado consiste en recurrir al argumento de una patente que se guarda bajo llave y

cuyo secreto no ha sido revelado. Quien da este tipo de explicación es un total ignorante sobre cuestiones legales y, en particular, sobre el tipo de documento que constituye una patente. Para comenzar, una patente es un documento público que puede ser consultado en cualquier base de datos de patentes. Las patentes se hacen públicas porque, justamente, los inventores afirman haber descubierto un procedimiento de interés industrial antes que ningún otro competidor y reclaman que se les paguen derechos por el uso de su patente si se quiere explotar de forma comercial. Eso hace, por ejemplo, que no se puedan prohibir ni limitar los usos no comerciales de una patente y que, en todo caso, su contenido no sea secreto. Pero es que, además, las patentes caducan al cabo de veinte años y, pasado este tiempo, cualquiera puede usar el método patentado sin tener que pagarle nada a nadie: esa es la razón por la cual hay medicamentos genéricos de múltiples laboratorios (piense en el paracetamol, el ibuprofeno o la amoxicilina). Por tanto, una patente no oculta ningún invento a nadie.

Yendo ya al tipo de inventos de energía libre más habituales, lo común es que las presuntas invenciones procuren explotar bien propiedades químicas exóticas de ciertas sustancias (el ejemplo del boro de Estévez vuelve a la mente), bien efectos del electromagnetismo que son poco conocidos por el público general. En el primer caso, el estafador tiene que ocultar que utiliza la sustancia, porque el público fácilmente se podría dar cuenta de que hay un ingrediente mágico que hace posible el milagro y, en este sentido, los vídeos por internet son una solución ideal para esconder el truco. En el caso de los efectos del electromagnetismo, las posibilidades son mucho más grandes, y reconocer el engaño no siempre resulta fácil sin tener un poco de formación en física. Por ejemplo, hace unos años se popularizaron unos *motores magnéticos* que eran capaces de proporcionar cantidades significativas de electricidad simplemente al combinar un rotor con sentido de giro único y unos imanes convenientemente ubicados que, al cerrarse en torno al rotor, lo forzaban a girar a velocidad considerable, de modo que se podía usar ese giro para hacer trabajo útil, desde generar electricidad hasta mover directamente máquinas. Dado que ningún combustible era consumido, la conclusión fue que, gracias al magnetismo, teníamos una fuente de energía infinita, lo que contradecía el primer principio de la termodinámica. Lo que los avispados comercializadores del invento no explicaron es que la fuente de la energía oculta eran, en realidad, los

propios imanes: un imán es una estructura ordenada de átomos (cada átomo es como un pequeño imán, lo que se denomina *espín*) y no se encuentra de forma habitual en la naturaleza. Imantar una aleación ferromagnética implica consumir una gran cantidad de energía para generar un campo magnético intenso que alinee los espines de los átomos para inducirles un magnetismo permanente. Sin embargo, debido a la temperatura (movimientos aleatorios de las moléculas), los espines se van desalineando hasta que el material pierde totalmente el magnetismo; en las máquinas magnéticas los imanes se recalientan y van perdiendo, poco a poco, el magnetismo. Al final, la energía que puede devolvernos el motor magnético es inferior a la energía que se gastó en el primer momento para magnetizarlos, tal como exige el segundo principio de la termodinámica. Ni que decir tiene que si uno mira la factura eléctrica tras haber imantado los imanes, y la compara con lo que ha trabajado la máquina, verá que es un método caro (y estúpido) de generar energía.

Otra variante de estas estafas tiene que ver con la gran capacidad energética de los hidrocarburos líquidos. Existen multitud de motores que funcionan combinando gasolina o diésel con agua, en teoría, creando ciertos *efectos cuánticos*. La realidad es que simplemente la capacidad de combustión de los combustibles derivados del petróleo es tan alta que, incluso mezclados con agua, siguen quemando y pudiéndose usar en motores convencionales o adaptados, aunque, por descontado, pierdan potencia. Cuando uno al final echa cuentas, ve que esos motores tienen un consumo de combustible por kilómetro mucho peor que el de los motores convencionales, pero nos dejamos maravillar fácilmente porque un motor pueda funcionar con agua (aunque esté mezclada con grandes cantidades de gasolina).

Para terminar, comentaré una última variante, la de los materiales novedosos con propiedades exóticas y básicamente mágicas. Hace unos años, eran los fullerenos y los nanotubos de carbono y en la actualidad el material mágico de moda es el grafeno. Todos estos materiales existen realmente y son objeto de investigación científica legítima en diversos ámbitos de la física de los materiales, pero las propiedades que les atribuyen algunos estafadores son simplemente exageraciones sin fundamento con las que se busca conseguir embaucar a inversores incautos. Si un laboratorio puntero en los Estados Unidos está haciendo un trabajo científico, legítimo,

en las aplicaciones del grafeno para mejorar las prestaciones de las baterías, al día siguiente aparece una empresa en España que dice haber resuelto todos los problemas en los que el laboratorio norteamericano lleva décadas trabajando y que incluso ya puede ofrecer productos de grandes prestaciones basados en su tecnología patentada. Por supuesto, afirmar bravuconadas es más fácil que el paciente y laborioso trabajo de investigación que, de forma más bien callada, se hace en los laboratorios. Pero, al final, la sucesión de promesas incumplidas y la exageración con la que a veces se reciben ciertos avances científicos acrecientan la desconfianza del público, y una parte sospecha que si tal o cual empresa quebró, no fue porque fuera tan solo una tapadera para una gran estafa, sino porque nos ocultan algo.

En resumen, las energías libres de las que tanto les gusta hablar a algunos no son más que quimeras sin ninguna base física y abusan de la credulidad. El problema es que, al final, estas ideas absurdas se enraízan en el sistema de prejuicios de algunas personas, con lo que convencerlas de lo contrario resulta muy difícil, si no contraproducente. La mejor manera de combatir estas falsas soluciones de YouTube y las páginas web alternativas consiste en esperar a que salgan prototipos comerciales a gran escala de sus maravillosos descubrimientos, cosa que, por supuesto, nunca sucede, a pesar de que ahora más que nunca necesitaríamos esas soluciones milagro.

17POR QUÉ NO VAMOS A TENER UN COCHE ELÉCTRICO

Utilicemos en el siguiente ejemplo números sencillos, para entendernos.

La energía que contienen las baterías se mide en *kilovatios hora* (kW h). El kilovatio hora es la energía que carga una batería si la conectas a un cable con una potencia de un kilovatio durante una hora (eso suponiendo que no haya pérdidas, que siempre las hay, aunque sean pequeñas).

Imagínese el lector que quiere comprarse un coche con una batería cuya capacidad sea de 50 kW h. No es un coche pequeño, pero tampoco es de los grandes. Busca un coche para toda la familia y para ir al trabajo. Con esa batería, el fabricante le dirá que el coche puede llegar a recorrer 250 km con una carga completa de la batería (aproximadamente, son 100 km por cada 20 kW h), pero los fabricantes siempre exageran. En la práctica, en condiciones de conducción real, la mayoría de las veces se podrán recorrer unos 150 km (debido a si hay cuestas, si se usa el aire acondicionado o la calefacción, si la batería ya tiene un tiempo…). Pero imaginemos que esos 150 km le son suficientes para el día a día, de modo que, como el coche no es demasiado caro, se decide a comprarlo.

El problema viene a la hora de cargar el coche. Es un sudoku de lo más complicado. No es imposible, pero hay que calcular mucho y andarse con ojo.

Supongamos que en su casa tiene contratada una potencia eléctrica de 4,4 kW, que es una potencia contratada bastante habitual en los hogares españoles. Con eso, las cargas completas son complicadas. Incluso aunque pusiera a cargar el coche cuando prácticamente no haya otro aparato consumiendo electricidad en su casa (de noche, cuando todos duermen), para cargar por completo los 50 kW h del coche necesitaría más de once horas usando toda la potencia eléctrica de la casa.

Pero cargar el coche completamente es un caso extremo, es verdad. Imaginemos que no necesita cargar del todo la batería porque solo hizo 60 km: aun así, se necesitarían cuatro horas y media en las que apenas se podría usar nada eléctrico en su casa.

No seamos tan cenizos y vayamos a un caso más favorable. Pongamos que el lector es un usuario medio que conduce unos 35 km al día. De acuerdo con el fabricante, eso debería corresponder a un consumo de 7 kW h, pero ya hemos comentado que en condiciones reales el coche le va a gastar más, digamos que unos 11 kW h: son aún dos horas y media las que deberá alimentar el coche con toda la potencia de la casa. Puede preparar la instalación eléctrica de su hogar a fin de reservar una parte de toda la potencia, digamos 3 kW, para cargar el coche de noche (y que así no le salten los plomos al encender la luz). Con eso, recargaría lo que gastó para hacer esos 35 km en unas cuatro horas. Se puede hacer, pero hay que calcular mucho: cuidado con conducir más de 35 km —y, si lo hace, cuente con tiempo extra para recargar lo gastado de más—, no ponga la lavadora de noche, acuérdese de conectar el coche al llegar a casa y programar la carga y asegúrese de que esté las cuatro horas que necesita y que no deba coger el coche para una emergencia.

Si no quiere vivir con tanto estrés y tanto cálculo, podría contratar más potencia a su compañía eléctrica para no ir tan justo. El problema es que le saldría carísimo cada mes. Pero, espere, quizá la cosa sea mucho peor.

Quizás el lector sea de los que no tienen garaje y deben dejar el coche en la calle. Millones de coches duermen en la calle en nuestro país. Para poder recargar esos coches durante la noche haría falta poner un poste eléctrico por cada cinco metros de acera, aproximadamente. Si fueran postes de 22 kW, como los que quiere instalar el Gobierno en las gasolineras, en ciento veinticinco metros de calle habría que tender el cableado junto con los postes para poder suministrar más de un megavatio (MW) de potencia. Eso es lo mismo que suministra un aerogenerador pequeño. Una ciudad como Madrid, con más de mil kilómetros de calles, necesitaría cableados, subestaciones eléctricas y sistemas de control para disponer de unos 8 GW de potencia (es decir, como todas las centrales nucleares de España). Si extrapolamos estos datos para el resto de España, estaríamos hablando de más de 100 GW (al igual que la capacidad eléctrica máxima de España). Así planteado, vendría a ser una obra enorme, algo inimaginable, de modo que intentemos algo más modesto. Supongamos que se usaran postes de mucha menor potencia (por ejemplo, de 4,4 kW en vez de 22 kW) y también que no todas las calles estuvieran cableadas. Asimismo, estaríamos hablando de una infraestructura colosal: incluso si la redujéramos a la

décima parte de lo que calculamos más arriba, a *solo*10 GW, estaríamos hablando de una instalación enorme que requeriría levantar un montón de calles y gastarse un montón de dinero. Y para que luego los usuarios se dieran de tortas para pillar un poste libre de esos al volver tarde del trabajo cuando no pudieron recargar el día anterior. Sin contar con la acción de vándalos que cortaran los cables o de tipos aprovechados que te quitasen la manguera para cargar su coche en doble fila… Por otra parte, ¿quién pagaría la recarga? ¿Y cómo se pagaría? ¿Y el mantenimiento?

La alternativa sería recargar el coche en las electrolineras (estaciones de carga) que se vayan instalando. Los postes de 22 kW que propuso el Gobierno en 2019 recargarían completamente nuestro coche familiar sin pretensiones en dos horas y media, lo cual resulta demasiado lento. Si lo enchufáramos solo media hora (lo que daría como para unos treinta kilómetros), sería aún demasiado lento, sobre todo si hubiera otros coches esperando para recargar delante de nosotros: simplemente con dos coches por delante ya implicaría esperar una hora y media (una hora para que se cargasen ellos y media para que se cargase el nuestro). Y que no se les ocurra recargar más que para treinta kilómetros. ¿Se imaginan las colas que se podrían llegar a formar? ¿Y qué harían los propietarios de las estaciones de servicio? ¿Cuántos minutos nos dejarían cargar el coche para que las cuentas les salieran, para que pudieran ganar dinero?

Veamos aún otras alternativas. Podríamos usar postes de carga rápida. De estos no habría en todos los sitios, porque son más caros de instalar y de mantener, pero con uno de ellos podríamos cargar la batería por completo en media hora, o tan solo en cinco minutos a fin de recargar lo suficiente para treinta kilómetros. Eso ya comienza a ser más razonable. El problema de esos postes de alta potencia es que fuerzan las baterías, y eso acorta rápidamente su vida (se calientan mucho). Si usted visitara con frecuencia estos postes, la batería de su coche podría durar solo dos años. Incluso menos. Por eso los puntos de recarga de alta potencia no son una buena opción, y eso sin contar los peligros que supone usar potencias tan elevadas.

Y todavía hay más. Las baterías llevan fatal el calor: cuando la temperatura pasa de 35 ºC, se comienzan a deteriorar y, si sobrepasa los 40 ºC, se degradan muy rápido, incluso aunque no esté usando el coche. Algo que tener muy en cuenta en España. Intente aparcar el coche a la sombra, preferiblemente con un ventilador.

Y eso por no hablar de las limitaciones en la producción de litio y cobalto, de los costes prohibitivos, de las prestaciones escasas… De igual forma, tampoco hemos mencionado cómo subiría el precio de la electricidad si de repente hubiera tantos coches eléctricos que cargar y, a un tiempo, dispusiéramos de menos petróleo.

¿Qué significa todo esto? ¿Resulta una quimera, entonces, pasarse al coche eléctrico? Imposible no es, pero haría falta una coordinación extrema para hacerlo viable. Si todos actuáramos de una manera perfectamente coordinada y cuidadosa, los números saldrían; justitos, pero saldrían. Al menos sobre el papel. Ahora bien, ¿se cree el lector que nos íbamos a organizar a la perfección? ¿O esto acabaría siendo el follón habitual?

¿ES EL COCHE ELÉCTRICO UN COCHE PARA RICOS?

Lo cierto es que parece difícil la posibilidad de generalizar el coche eléctrico para todo el mundo. Resulta caro, de poca autonomía, con una vida de las baterías limitada y, si se generalizara, sería una locura a la hora de recargar. Así que el secreto se encuentra, quizás, en que no se generalice. En que haya relativamente pocos. Tal vez pasar de los veintisiete millones de coches que hay ahora en España a un millón (o incluso menos).

A lo mejor, el negocio de las empresas automovilísticas (lo poco que quede) estaría en hacer coches de gama alta, sedanes con baterías de 200 y 300 kW h, con autonomía de varios cientos de kilómetros, coches que se aparcasen solos y que hasta se condujeran solos, el más barato de los cuales se vendería por cien mil euros.

Quien se comprara un coche de esos seguro que contaría con un buen enchufe en su casa y no tendría problemas para contratar en su hogar una potencia de 15 kW de electricidad, o de 20 kW, o lo que necesitase para mantener todos los aparatos encendidos y el coche cargándose cuando le diera la gana. Incluso podría tener un par de coches para usar uno mientras se recarga el otro.

Pero hay algo que estos conductores adinerados seguirían necesitando: puntos de recarga dispuestos por el camino. Porque, cuando hicieran un viaje largo, necesitarían poder repostar en algún lugar. Y para eso tendría que haber puntos adecuados de recarga.

Y no parece que sea rentable instalar puntos de recarga para solo un millón (o quizá menos) de coches, al menos, no desde la perspectiva de los propietarios de las gasolineras. Así que esos puntos de recarga se deberían subvencionar, si se quiere que estén ahí. El Estado los tendría que avalar, incluso obligar a que se construyeran.

Si el coche eléctrico no se generaliza (y, como hemos dicho, es difícil que esté al alcance de todo el mundo), apostar por poner muchos puntos de recarga por todo el territorio nacional, invirtiendo para ello una suma considerable de dinero público y dando subvenciones al coche eléctrico, podría acabar convirtiéndose en una transferencia de dinero de los pobres a los ricos. Así que, antes de lanzarse a esta aventura en la que todos actúan como si los problemas del coche eléctrico estuvieran resueltos o a punto, convendría hacer un análisis mucho más pormenorizado y con planteamientos mucho más realistas. Porque no está claro que esto del coche eléctrico nos interese a todos.

¿REALMENTE INTERESA APOSTAR TANTO POR EL COCHE ELÉCTRICO?

Nos están vendiendo un futuro deslumbrante de movilidad eléctrica, pero lo que hay ahora mismo es algo mucho más limitado. No está claro que se pueda generalizar el coche eléctrico privado para todos. Probablemente no vaya a ser posible y, casi con seguridad, no resulte rentable hacerlo.

Se insiste, una y otra vez, en que el coche eléctrico es el futuro, como si fuera una verdad evidente e indiscutible, una panacea universal, cuando en realidad tendríamos que aclarar unas cuantas cosas antes de lanzarnos a invertir en una nueva burbuja que pueda empeorar aún más las condiciones de vida de la mayoría para que solo se beneficien unos pocos.

Los defensores de esta transición al coche eléctrico tendrían que plantearse si, en verdad, no se está promoviendo que se subvencione, con cargo al erario público, un medio de transporte reservado a las clases más pudientes como el tren AVE (con subvenciones directas al coche eléctrico e indirectas por la vía de las estaciones de carga o los privilegios de uso del espacio público).

Sin duda, habrá que tomar medidas contra la contaminación, el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles. Pero, por lo menos

hoy en día, el coche eléctrico no parece que sea la solución más adecuada.

18POR QUÉ NO ES POSIBLE IGNORAR EL DAÑO QUE CAUSAMOS AL MEDIOAMBIENTE

Hay una cierta tendencia en los medios de comunicación de hoy en día a identificar los problemas ambientales de nuestra sociedad con el cambio climático, como si este fuera el principal o incluso el único de los problemas ambientales que padecemos. Nada más lejos de la realidad. Lo cierto es que los científicos que trabajan en el estudio del medioambiente prefieren hablar de *cambio global*antes que de *cambio climático*, como un concepto más genérico que este último, al que englobaría. Por una parte, expresa la idea de que nuestro medioambiente está cambiando, lo cual no sucede por azar, sino por toda una serie de procesos que estamos desencadenando los humanos (por eso, a veces, se le añade el adjetivo *antropogénico*). Y, por otra parte, expresa la idea de que es un proceso global, no solo en su acepción de «planetario», sino que engloba todas las múltiples áreas del medioambiente: todo está viéndose afectado por la denominada *presión antrópica*, que es la que ejerce la humanidad sobre todo el entorno en su incesante búsqueda de recursos y por su irrefrenable capacidad de polucionar.

Llevar a cabo el ejercicio de enumerar todos los efectos que quedan enmarcados dentro del contexto del cambio global sería muy pesado y, a buen seguro, deprimente. Sin embargo, para que el lector pueda hacerse una idea más clara acerca de qué estamos hablando, me parece oportuno enumerar unos cuantos casos de entre los problemas ambientales más graves causados por la mencionada presión antrópica. Dejo de lado en esta relación el cambio climático, al que dedicaré todo el capítulo siguiente.

Uno de los mayores problemas ambientales es la polución atmosférica. De acuerdo con los datos de la Organización Mundial de la Salud, cada año se producen en el mundo ocho millones de defunciones debidas a la contaminación del aire, y es la primera causa de muerte de todo el planeta. Bien es cierto que la mejora de las condiciones de vida a escala global ha logrado que muchos otros factores que antes causaban altas mortalidades

hayan prácticamente desaparecido y eso ha hecho ganar una importancia relativa a nuevos factores antes minoritarios, pero también es significativo que la contaminación del aire sea el mayor factor de mortalidad actual. La calidad del aire en las ciudades de Occidente es, en general, mucho mejor de lo que era hace décadas (aunque algunos episodios de alta contaminación nos recuerden que aún pende sobre nuestras cabezas una espada de Damocles). Pero en los países que ahora se están industrializando, y particularmente en China, la fábrica del mundo, la calidad del aire es muy deficiente debido al excesivo uso del carbón y a la intensa actividad fabril.

La polución del agua potable es otra fuente de alta mortalidad y, sobre todo, de morbilidad (en cuanto a los días por año que la gente se pasa enferma). En Occidente, la vigilancia de las agencias ambientales limita el problema, aunque no sean pocos los ríos contaminados con metales pesados y residuos industriales que perduran en su lecho, acumulados durante décadas en las que la legislación fue más laxa. En los países en vías de desarrollo, la contaminación fabril es la principal fuente de contaminación de los ríos, de la que destacan los metales pesados y las toxinas orgánicas derivadas de la química del petróleo, sobre todo del benceno. En los países más pobres, los ríos acumulan grandes cantidades de residuos plásticos, principalmente envases que la gente tira en cualquier sitio sin tener en cuenta que el viento y la lluvia los acaba arrastrando a los ríos y, de allí, al mar. La sobreexplotación de las aguas subterráneas también origina contaminación: por ejemplo, en la India, el arsénico natural en esas rocas alcanza concentraciones peligrosas en el agua de los pozos al bajar el nivel freático, mientras que en otros lugares las aguas subterráneas se salinizan debido a la intrusión del agua de mar, que ocupa el espacio que deja vacante el agua dulce extraída en exceso. Los residuos orgánicos de toda índole y, especialmente, los de origen ganadero se filtran en el subsuelo y contaminan el agua incluso en España.

El estado general del mar es en extremo preocupante. El aumento de la temperatura del agua y la absorción de CO_2 atmosférico literalmente aniquila grandes extensiones de coral y poblaciones enteras de equinodermos y estrellas de mar. La eutrofización de las aguas (exceso de nutrientes, en general por culpa del uso excesivo de abonos en los cultivos que son luego arrastrados a los ríos y, de allí, al mar) hace que se produzcan floraciones masivas de algas que generan toxinas peligrosas, incluso para el

ser humano, o que simplemente agotan el oxígeno disuelto en el agua, lo que crea zonas muertas en el océano interior y origina mortandades masivas de peces y otros animales marinos (con el triste caso de la Manga del Mar Menor de Murcia como ejemplo español, pero en todo el mundo se han dado episodios mucho más masivos). Las pesquerías están sobreexplotadas y, sin una adecuada gestión, muchas especies piscícolas que se comercializan podrían desaparecer de aquí a 2040. Los plásticos proliferan en el mar, y los más grandes se acumulan en el centro de los giros subtropicales de todos los océanos, pero los microplásticos son ingeridos por el zooplancton y acaban entrando en la cadena trófica marina y, a la larga, en el plato de muchas personas, con efectos disruptores endocrinos. La gran presencia de metales pesados hace que, hoy en día, se desaconseje a niños y mujeres embarazadas comer atún, mientras que el empobrecimiento de las poblaciones de peces y la gestión incorrecta de los residuos de la pesca causan que la incidencia de anisakis (gusanos parásitos) sea del cien por cien en algunas especies comerciales de pescado. El abuso de las redes de arrastre ha esquilmado praderas de posidonia marina y destruido el hábitat de decenas de especies. Asimismo, la falta de algunos depredadores, diezmados por la sobrepesca, favorece la proliferación de medusas. Y todo eso solo por citar algunos de los graves problemas que padece el mar.

En tierra firme, las cosas no son mucho mejores. En Europa, los lugares ocupados por antiguas fábricas están vallados porque la contaminación del suelo hace peligroso siquiera acercarse allí. En casi todo el mundo hay balsas de lixiviación, tóxicas y fuertemente ácidas, abandonadas después de décadas de actividad minera. En la región china de Mongolia Interior, el lago Baotou está tan contaminado que las miasmas tóxicas que se evaporan de él pueden causar graves enfermedades a quien se exponga. Países del África Occidental como Ghana se han convertido en auténticos vertederos de basura electrónica; los jóvenes queman los componentes electrónicos para extraer los miligramos de oro y plata que contienen y en el proceso liberan potentes tóxicos que los hacen enfermar y, en muchos casos, morir antes de cumplir los veinticinco años. Y en todo el mundo solo se ha desmantelado completamente una central nuclear y se han eliminado del sitio todos sus residuos radioactivos, aunque solo para transportarlos a otro lugar, mientras que unas cien centrales decomisadas mantienen sus peligrosos residuos aún en su emplazamiento. El cementerio nuclear

subterráneo de Asse-2, en Alemania, tiene tal cantidad de filtración de aguas que se asume que los compartimentos de contención de los residuos radioactivos están comprometidos y deberían ser reforzados antes de 2025 si se quiere evitar que la contaminación llegue a las aguas subterráneas. En todo el mundo occidental, aunque se separen los residuos para favorecer el reciclaje, solo se recicla en los propios países entre el 10 y el 20 % de los residuos, mientras que el resto se exporta a otros países. Hasta 2018, el destinatario de esa exportación de residuos era China, que los reaprovechaba para su producción industrial, pero, después de años de acumular residuos, acabó teniendo tamaño problema ambiental (algunos plásticos, al degradarse, generan residuos tóxicos) que prohibió completamente la importación de plásticos y envases, que ahora se dirigen a otros países.

El uso abusivo de los pesticidas está acabando con la población de insectos polinizadores, como las abejas, fundamentales para los cultivos. A su vez, la disminución generalizada de las poblaciones de insectos ha mermado las poblaciones de aves insectívoras. La naturaleza está ahora más callada que hace décadas. Entre tanto, especies invasoras ocupan el lugar que antes ocupaban otras especies autóctonas y a veces causan estragos en los ecosistemas: la avispa asiática arrasa las colmenas de abejas melíferas, el escarabajo picudo destruye las palmeras y la *Xylella fastidiosa*, una bacteria, avanza por el Mediterráneo matando olivos, viñas y almendros sin que se le encuentre una cura. El Tajo baja seco y no es posible hacer el trasvase al Segura; el delta del Ebro se hunde por la falta del aporte de sedimentos del Ebro, en parte retenidos en las presas, en parte disminuidos por la pérdida de caudal. La desertificación avanza por la esquina sudeste de la península Ibérica a consecuencia de las temperaturas extremas y su retroalimentación con el régimen de lluvias, junto con una mala gestión de los recursos hídricos, todo ello, obviamente, favorecido por el cambio climático. Los cambios en la circulación de la atmósfera asociados al deshielo del Ártico crean situaciones de bloqueos alternos de masas de aire africano y polar, de modo que se turnan en cualquier época del año semanas de calor extremo con otras de frío relativo y mayor precipitación, de manera muy radical y con gran riesgo para la agricultura.

La disminución de los espacios protegidos, la contaminación y la sobreexplotación han llevado a una pérdida de la biodiversidad de tal

magnitud que algunos investigadores hablan ya de la sexta extinción. Aparte de cuestiones morales sobre el derecho que nos adjudicamos a exterminar masivamente a otras especies, la pérdida de biodiversidad favorece la propagación de enfermedades y la falta de adaptación a situaciones extremas y, en general, vuelve frágil nuestro propio ecosistema, el que nos da sustento. Al mismo tiempo, por una selección forzada por la mano del hombre, proliferan malas hierbas resistentes a nuestros pesticidas y de difícil erradicación, mientras que aparecen nuevas enfermedades de las plantas que diezman los cultivos. La sobreexplotación de los suelos agrícolas, con un arado excesivo y el uso abusivo de fertilizantes artificiales, destruye la capa fértil de la tierra, de modo que en pocas décadas no quedará tierra naturalmente fértil y la producción de alimentos dependerá del suministro de fertilizantes artificiales, que para entonces podría verse comprometido por la falta de combustibles fósiles.

Todo lo arriba mencionado no es más que una lista somera e introductoria de algunos de los problemas ambientales que nos aquejan hoy.

Tomados de forma aislada, los problemas arriba enunciados tienen la capacidad de comprometer la continuidad de nuestra especie en el planeta; tomados de forma conjunta, suponen una amenaza para la vida humana como no se ha conocido antes. Debemos considerar que, si bien muchos de estos efectos presentan graves consecuencias para muchas otras especies animales y vegetales, al final de lo que estamos hablando aquí es de la continuidad de la especie humana. Es muy difícil que el ser humano sea capaz de exterminar toda la vida del planeta, así que en cierto sentido se podría decir que no es la Tierra lo que está en peligro, sino nuestro hábitat, esto es, la capacidad de la propia Tierra de sostener la vida humana. En definitiva, no está en peligro el planeta, sino nosotros mismos. No queremos salvar la Tierra, sino salvarnos.

19POR QUÉ NO VOLVEREMOS A TENER EL CLIMA DE OTRO TIEMPO

Sin duda, el gran problema ambiental de nuestro tiempo, aquel sobre el que comienza a haber una mayor conciencia global, es el cambio climático. Este fenómeno presenta algunas características que lo hacen único. La más importante es que se trata de un proceso verdaderamente global: no importa dónde se estén quemando los combustibles fósiles que originan el dióxido de carbono, este gas no tóxico, inodoro e invisible se dispersa rápidamente por toda la atmósfera (una molécula habrá dado la vuelta al mundo en cuestión de días) y genera, por tanto, un efecto uniforme en todo el planeta. Eso quiere decir que, aunque hayamos externalizado las fábricas y, con ellas, la contaminación, a China, la mayoría de las sustancias tóxicas que salen de sus chimeneas se quedan en China, pero los efectos asociados al CO_2también vamos a sentirlos aquí. Esta es una de las razones por las cuales en Occidente se le ha dado tanta importancia al cambio climático: no solo porque es un problema grave, que efectivamente lo es, sino porque no se lo podemos endosar a otro y nosotros también lo vamos a padecer (en realidad, ya lo estamos padeciendo).

Asumo que el lector ya conoce cuál es la problemática que se deriva de los gases de efecto invernadero, pero, para ser exhaustivo, la resumiré brevemente en lo que sigue. La Tierra recibe la radiación solar, una mezcla de radiaciones electromagnéticas de muchas longitudes de onda, aunque la mayoría de la energía vaya dentro del rango del espectro electromagnético que denominamos *rango visible*, porque son las longitudes de onda que nuestro ojo puede captar. La atmósfera de la Tierra deja pasar la mayoría de la energía en el rango visible (la atmósfera es transparente, por eso vemos el Sol, la Luna y las estrellas), que solo es bloqueada parcialmente por las nubes y un poco dispersada por el polvo, los aerosoles, el humo, etcétera. Esa radiación solar llega a la superficie de la Tierra, que la absorbe: como la energía se conserva, esa energía electromagnética se convierte en energía térmica y la superficie se calienta. Parte de esa energía térmica se transmite por contacto directo al aire que está encima, que se calienta, asciende y

entonces se generan los vientos, y otra parte es remitida de vuelta hacia el espacio como energía electromagnética, aunque las longitudes de onda que lleva la mayoría de esa energía rerradiada sean diferentes de las del Sol. De acuerdo con la ley de Planck, las longitudes de onda dominantes vienen fijadas por la temperatura a la que se encuentre el cuerpo. El Sol está a 5.500 ºC y, por tanto, le corresponde una emisión electromagnética dominada por el rango visible, pero la Tierra se encuentra a unos 15 ºC y, en consecuencia, su radiación se halla mayoritariamente centrada en el rango del infrarrojo térmico (esa radiación que se puede ver con gafas especiales de visión nocturna). El problema es que, si bien la atmósfera es transparente a la radiación visible, es mucho menos transparente a la radiación infrarroja debido a que buena parte de los gases que componen la atmósfera muestra cierta capacidad de reabsorber la radiación infrarroja y remitirla de vuelta a la superficie. Eso es el *efecto invernadero*: debido a la capacidad de absorción de la energía infrarroja de ciertos gases presentes en la atmósfera, parte de la energía emitida por la superficie de la Tierra es retenida por la atmósfera y eso contribuye a aumentar la temperatura del planeta.

El efecto invernadero es, en realidad, positivo para el planeta. Si no fuera porque la atmósfera terrestre contiene de manera natural cantidades significativas de gases de efecto invernadero (el más importante de los cuales, por cantidad y efecto, es el vapor de agua), la temperatura del planeta sería de -15 ºC, unos treinta grados por debajo de la actual. El problema, por tanto, no es la presencia en sí del gas de efecto invernadero, sino su incremento. A medida que la concentración de estos gases aumenta, lo hace también la cantidad de energía retenida y, consecuentemente, aumenta la temperatura. Hablar de *calentamiento global* es, sin embargo, un poco confuso, porque no toda la Tierra está a la misma temperatura y, además, la temperatura de cualquier sitio cambia con la época del año. Por eso es mejor fijarse en las temperaturas medias y, además, en áreas relativamente grandes: es lo que se conoce como *variables climáticas*. Asimismo, aunque toda la energía acabe finalmente disipada como energía térmica (de nuevo y siempre, el primer principio), este incremento de energía no tiene por qué distribuirse de forma homogénea por toda la Tierra. De hecho, hay zonas que se están calentando más que otras e incluso hay pequeñas zonas que han experimentado ligeros enfriamientos temporales. Lo que sí es cierto es que el sistema climático se halla acumulando energía,

y eso hace que el clima del planeta esté cambiando: se vuelve más brusco, más violento, más extremo…

Durante largos períodos de tiempo, la Tierra ha estado en equilibrio radiativo. Le llegaba cierta cantidad de energía del Sol: una parte se reflejaba directamente mientras que la otra contribuía a calentar la superficie, la cual emitía cierta cantidad de radiación infrarroja y, de nuevo: una parte se perdía en el espacio y la otra era reflejada de vuelta a la superficie, que se calentaba un poco más y emitía, a su vez, radiación infrarroja, la cual, de nuevo, en parte pasaba al espacio y en parte se reflejaba, y así sucesivamente, hasta alcanzar un equilibrio. Para una concentración de gases de efecto invernadero determinada, hay una temperatura en que la energía infrarroja que finalmente escapa de la Tierra permanece en equilibrio con la energía de la radiación que absorbe del Sol, y en ese punto la Tierra ni se calienta ni se enfría. Alcanzar ese punto de equilibrio lleva varios siglos, pero la Tierra, antes de que la humanidad comenzase a quemar combustibles fósiles de forma masiva, estaba en equilibrio. Ahora ya no: incluso aunque detuviéramos toda la quema de combustibles de repente, la temperatura seguiría subiendo un siglo o dos, hasta alcanzar de nuevo el equilibrio entre la energía que nos llega del Sol y la que es rerradiada al espacio. Y llevaría por lo menos un milenio que los procesos naturales de la Tierra absorbiesen suficiente CO_2 como para que la temperatura comenzase a bajar, y eso suponiendo que no hayamos desequilibrado esos ciclos naturales y que aún funcionen. Además, existe el peligro de que hayamos sobrepasado cierto punto crítico de calentamiento a partir del cual la Tierra, en vez de absorber CO_2 gracias al ciclo vegetativo de las plantas, liberaría otros gases de efecto invernadero (mayoritariamente, metano) acumulados durante milenios en las heladas tierras de la tundra o en algunos fondos marinos someros. Si eso pasase, el efecto equivaldría a multiplicar por tres la actual concentración de CO_2, lo que generaría un calentamiento desbocado y catastrófico.

Hay quien argumenta que la Tierra tuvo concentraciones atmosféricas de CO_2 en épocas geológicas anteriores mucho más altas (por ejemplo, al principio del cenozoico, hace cincuenta millones de años), y dan a entender con ello que la vida puede sobrevivir incluso con una concentración de dióxido de carbono muy superior a la actual. Aunque sea cierto, esa no es la cuestión: hace cincuenta millones de años no existían los humanos.

Además, la distribución de los continentes y la actividad solar también eran diferentes, y todo eso contribuyó a configurar el clima. Lo cierto es que el actual aumento de la concentración de CO_2 pone en peligro la continuidad de la civilización humana e incluso podría llevar a la especie a la extinción, aunque el clima se volviera ideal para albergar dinosaurios.

Así las cosas, el proceso que hemos iniciado podría dar al traste con nuestra existencia y, además, una parte de él ya es imparable: a estas alturas, resulta imposible detener un cambio climático en marcha durante los próximos siglos o quizá milenios. Lo único que podemos hacer es no agravarlo y adaptarnos a él. La época geológica que hemos vivido desde el final de la última glaciación hasta ahora es la conocida como Holoceno, una época climáticamente óptima para los humanos, con estaciones muy bien definidas y ciclos de precipitaciones predecibles y regulares de periodicidad anual. Esa regularidad del Holoceno fue lo que permitió la aparición de la agricultura (revolución neolítica), la invención de la escritura, el nacimiento de las primeras civilizaciones humanas y la extensión de la humanidad por todo el planeta. Puede parecer algo muy remoto en el tiempo, pero geológicamente corresponde a un suspiro: han pasado poco más de diez mil años desde el inicio del Holoceno. Antes de él, las escasas poblaciones de humanos aún eran cazadores-recolectores sin escritura: transcurría la prehistoria. Con el cambio radical del clima que inaugura el final de la última glaciación, comienza la historia de la humanidad: de hecho, toda nuestra historia se circunscribe a esta época geológica, el Holoceno. No es en absoluto una coincidencia: sin agricultura, la humanidad no habría podido desarrollarse de la forma en que lo ha hecho. Pero ahora hemos desestabilizado el clima del planeta, hemos destruido la regularidad salvífica del Holoceno e inaugurado una nueva época que ya se conoce como *Antropoceno*. Una época geológica en la que cultivar alimentos va a ser mucho más difícil, con largos períodos de sequía punteados por otros de inundaciones. Si el Holoceno permitió la expansión de la humanidad, el Antropoceno puede suponer su condena.

Algunos líderes políticos creen que, por medio de la geoingeniería, seríamos capaces de detener los procesos que están en marcha. No es en absoluto realista. La cantidad de gases de efecto invernadero que hemos vertido a la atmósfera es tan gigantesca (y la incrementamos cada año a razón de treinta y seis mil millones de toneladas solo de CO_2) que deja en

un lugar ridículo cualquier proyecto de geoingeniería que se quiera plantear. Y, para llegar a una escala lejanamente operativa, se tendrían que emplear cantidades ingentes de energía y materiales, justo en un momento en que estos empiezan a escasear, y eso por no hablar del CO_2 adicional que se emitiría con tal despliegue. En suma, la geoingeniería es el equivalente a intentar apagar un incendio en el Amazonas lanzándole una lata de gasolina: el tamaño de la intervención es ridículamente pequeño comparado con el del problema que se quiere tratar y, encima, va en la dirección equivocada.

Con todo, en las altas instancias políticas se comprende bien la gravedad del asunto. En el ámbito de la Comisión Europea, hace veinte años se hablaba aún de la lucha contra el cambio climático. Hace diez, la palabra clave era «mitigación»: ya no se pretendía el imposible de contrarrestar el cambio climático en curso, pero al menos se buscaba reducir sus efectos. Actualmente, de lo que se habla es de «adaptación»: no vamos a poder evitarlo y sufriremos sus efectos a gran escala. Por tanto, lo que debemos hacer es prepararnos para ello y realizar los cambios necesarios para que sus efectos sean lo menos dañinos posible para la población humana.

Esta es la realidad con la que vamos a tener que vivir y con la que tendrán que convivir nuestros hijos. El clima no va a estabilizarse en siglos y aún no ha terminado de cambiar. Las condiciones de vida serán mucho más difíciles para la mayoría, y va a ser peor aún si se tiene en cuenta que nos van a faltar recursos que, hoy en día, son abundantes. La única cosa que está en nuestra mano es no agravar semejante problema. Y, sin embargo, ante esta situación tan crítica, no estamos haciendo nada realmente útil. Nuestros líderes políticos son incapaces de reaccionar ante el mayor peligro al que ha hecho frente la humanidad a lo largo de su historia. ¿Por qué?

20POR QUÉ NO SALDREMOS NUNCA DE ESTA CRISIS

Como hemos visto a lo largo de este libro, la producción de combustibles fósiles, que constituye hoy en día el 86 % de toda la energía primaria que se consume en el mundo, está comenzando a experimentar un proceso de disminución progresiva irreversible. Se trata de un proceso previsto desde hace décadas y que obedece a las leyes de la física y de la geología. No podremos evitar que la producción de combustibles fósiles disminuya progresivamente a lo largo de las próximas décadas. Lo único que llegaremos a cambiar, si hacemos las cosas peor, es que la caída sea más rápida de lo que resulta estrictamente necesario (por ejemplo, invirtiendo los recursos disponibles en falsas soluciones o embarcándonos en guerras estériles por el control de los últimos recursos).

Las fuentes de energía renovable, aunque tengan un potencial de producción de energía muy elevado, solo podrían llegar a cubrir una fracción del total de energía consumido hoy en día. Además, nos estamos quedando sin tiempo para lanzar un despliegue renovable a gran escala que debería llevar décadas. Además, un despliegue de tal naturaleza requeriría enormes cantidades de recursos minerales diversos, algunos de los cuales, como el cobre o el litio, también van a comenzar a escasear pronto.

Por si lo anterior fuera poco, todo esto sucede en un momento en el que la humanidad se enfrenta a grandes retos ambientales, entre los que descuella el cambio climático por su alcance global. Unos retos que requerirían grandes despliegues de ingeniería en un contexto que va a ser de recursos escasos. Justo cuando más vamos a necesitar de la energía y los materiales para reparar el desastre ambiental (causado, por cierto, por nuestro uso inmoderado de energía y materiales), estos se van a volver escasos.

Tenemos por delante el trazado de la tormenta perfecta, el *petrocalipsis* que comentábamos al comienzo de este libro. ¿Cómo hemos llegado hasta aquí? ¿Por qué se suceden todas estas crisis simultáneamente? ¿Cómo puede ser que no seamos capaces de reaccionar?

La respuesta a todas estas preguntas se resume en una simple palabra, mil veces escuchada: debido al *capitalismo*. O, para ser más precisos, a la necesidad de crecimiento económico que tenemos y que es inherente al sistema capitalista.

La discusión teórica de por qué el capitalismo necesita, esencialmente, del crecimiento económico daría, por sí misma, para escribir un libro entero. De hecho, la discusión de qué es el capitalismo requeriría también un libro. Así pues, voy a simplificar la discusión, sabiendo como sé que habrá mucha gente que no esté conforme y que criticará este libro precisamente por este capítulo. A estas personas les ruego que, si lo tienen a bien, ignoren estos últimos capítulos y se centren en los anteriores, hasta que algún día, quizá, entiendan el sentido de lo que voy a explicar aquí.

Se suele asociar el capitalismo con las nociones de *propiedad privada* y de *libre mercado*. Es cierto que el capitalismo se origina a partir de esas dos premisas, pero eso no es lo que lo caracteriza. De hecho, ha habido otros sistemas económicos anteriores que ya se basaban en la propiedad privada y en el libre mercado. A decir verdad, el capitalismo actual se caracteriza, más bien, por la *propiedad corporativa* y por el*mercado intervenido*. Así pues, ¿qué es lo verdaderamente esencial al capitalismo?

Lo que caracteriza al capitalismo como tal es el hecho de que el capital tenga derecho a una remuneración, y que esta remuneración sea proporcional a su tamaño: a un porcentaje, vamos. Es decir, lo que es inherente y caracteriza al capitalismo es la idea de que se invierta un dinero y que se vaya a recuperar ese dinero más un cierto interés. Es el *interés compuesto* el que genera, pues, la necesidad del crecimiento.

En el capitalismo de inicios del siglo XXI, el dinero no permanece ocioso. Las grandes empresas funcionan con financiación ajena porque tener el dinero quieto resulta contraproducente. Así, toman sus recursos y los invierten en una diversidad de actividades: una parte va a la actividad propia, pero también a actividades ajenas, y, si necesitan más dinero, lo piden prestado al banco. Hoy en día, es impensable que una empresa de cierto tamaño ahorre dinero de sus beneficios para acometer una inversión. Lo que se lleva es estar siempre pidiendo prestado a los bancos. De donde toda la actividad productiva está sometida al régimen que le imponen las instituciones financieras. Esta manera de funcionar, propia del capitalismo, garantiza que el capital financiero vaya a conseguir una remuneración. Al

final, todo el capital del mundo, ya sea a través de *fondos de inversión* que capitalizan las grandes fortunas, ya a través de *fondos de pensiones* que recogen el dinero de los pequeños ahorradores, prácticamente todo el capital acumulado del mundo está en movimiento en el circuito financiero. Ese capital necesita producir beneficios. Necesita recibir un interés. Por tanto, ese capital está siendo invertido una y otra vez mientras se espera que esas inversiones den un rendimiento. De aquí proviene la necesidad misma de crecimiento.

Y no se trata de uno precisamente lento: con un crecimiento del PIB del 2,7% anual (un porcentaje que nos puede parecer bastante moderado), el valor del PIB se duplicaría cada veinticinco años. Es decir, se multiplicaría por cuatro cada cincuenta años, o por dieciséis cada cien. La España de principios del siglo XXI tiene un PIB anual de poco más de un billón de euros. ¿Se imaginan cómo debería ser la España del siglo XXII, con un PIB de dieciséis billones, es decir, equivalente al 80% de la economía estadounidense actual? ¿Cómo se conseguiría ese incremento del valor económico de los bienes y servicios que se prestarían en España, que es lo que se contabiliza en el PIB? ¿Produciendo dieciséis veces más bienes y servicios? ¿Acaso se van a vender dieciséis veces más coches y teléfonos inteligentes? ¿Vamos a recibir dieciséis veces más turistas? Los economistas clásicos, en vista del absurdo que eso plantea, responderán que no, que la clave consiste en centrarse en aquellas actividades y productos de mayor valor añadido, pero lo cierto es que la actividad productiva se sigue centrando, en buena medida, en las necesidades reales de la gente. Además, como ya comentamos hablando de eficiencia, un mayor valor añadido implica de manera prácticamente inevitable un mayor consumo de energía y también de materiales, con lo que en cuanto al impacto no se diferenciaría de multiplicar por dieciséis el consumo actual de bienes más básicos. De hecho, aunque a los economistas les moleste que se les señale, a igualdad de otros factores, lo que más hace crecer el PIB es el aumento de la población, porque una persona nueva es una unidad nueva de consumo con todas sus necesidades a cuestas por cubrir. Por eso la población del mundo se ha disparado durante el último siglo y medio: porque le venía bien a la economía. Ahora reflexionemos un poco más: si España tiene cuarenta y siete millones de habitantes hoy en día, ¿se imagina el lector cómo debería ser la España que verán nuestros nietos, la del siglo XXII, con setecientos cincuenta millones de habitantes? Y, encima, el problema es que la

irracionalidad del crecimiento no se detiene nunca: dejemos pasar otro siglo y España tendría que estar poblada por mil doscientos millones de habitantes, la sexta parte de la población mundial de hoy en día, y, un siglo después, ascendería a diecinueve mil doscientos millones de personas, más del doble de la población del mundo actual.

Esta es la magia perversa del interés compuesto: las cantidades crecen, y lo hacen a un ritmo vertiginoso si se miran en una perspectiva histórica. Pero el interés compuesto es la base del capitalismo. Sin un interés lo suficientemente alto (eso que los economistas ecológicos denominan *tasa de regeneración del capital* o *tasa de ganancia*), el capitalismo dejaría de existir. Sería otra cosa, pero distinta del capitalismo. Y, si no se da suficiente tasa de ganancia, eso, en un sistema como el nuestro, orientado al crecimiento, implica recesión, crisis económica, destrucción de la actividad económica y paro.

Hay quien dice que debemos abandonar el PIB como indicador de referencia, que deberíamos fijarnos más en *índices de desarrollo humano*. Eso es en realidad irrelevante mientras no se abandone el capitalismo. Si se presta atención al PIB, es porque se trata de una medida orientativa para el capital sobre el rendimiento medio de las inversiones que se hacen en un país. Si el Estado no midiera el PIB, lo harían empresas consultoras especializadas, porque el capital necesita conocer esa información para poder guiar su inversión. Por eso, además, no es importante el valor absoluto del PIB, sino su *tasa de variación*, su porcentaje de cambio, porque eso es lo que le da una idea al capital de cuál puede ser su rendimiento. España produce un billón de euros de PIB, y eso es mucho. ¿No nos podríamos conformar con eso? ¿Por qué, si ese PIB no continúa creciendo, las cosas van mal? Porque el capitalismo necesita del crecimiento, porque el capital necesita obtener beneficios, y no los tendrá en una economía estacionaria, no importa cuán grande sea. En una economía que no crece, el retorno de la inversión del capital es cero, no puede ganar dinero.

Pero nosotros nos encontramos ahora en una situación de descenso energético forzado. La disponibilidad de energía va a ir disminuyendo cada año. Recuerden el símil del descenso del «sueldo energético» aplicado al petróleo: en efecto, vamos a *cobrar* menos energía cada año y, con ese sueldo energético decreciente, tenemos que llegar a fin de mes. Por fuerza,

por tanto, nuestra actividad económica decrecerá porque no vamos a poder permitirnos mantener todas las actividades en marcha, al no alcanzar la energía disponible (ni, de hecho, los materiales) para todas. Y cada año será peor: por cada año transcurrido, tendremos que dejar de hacer más cosas para centrarnos solo en aquellas importantes. Encima, será forzoso destinar una cantidad creciente de recursos a luchar contra el problema ambiental que hemos creado, con lo que iremos todavía más justitos.

En medio de este contexto, resulta imposible obtener un crecimiento económico. Al contrario, lo que va a haber es un proceso de *contracción económica*. La cual no será constante ni tampoco igual en todas las partes del mundo. Es más, en algunas zonas se podrán experimentar temporalmente ciertos períodos de mejora a costa de sumir a otras zonas en una depresión económica mayor. En todo caso, estamos empezando un descenso que no solo es energético, sino también económico, y que será de tal calibre que acabará destruyendo el capitalismo tal como lo entendemos hoy en día. Esta crisis no acabará nunca.

Para evitar que alguien se haga una idea equivocada de lo que se habla aquí, cabe decir que el mismo problema del que adolece el capitalismo lo tiene el comunismo, por lo menos el comunismo tal como se ha entendido y practicado en el mundo durante el siglo XX. No en vano, los sistemas comunistas que hemos conocido son básicamente sistemas capitalistas de Estado, en los que dicho Estado poseía todos los bienes de producción y beneficios. Por lo demás, su *modus operandi* ha sido similar al del capitalismo y, de hecho, tras los choques ideológicos de mitad del siglo pasado, a partir de la última década del siglo XX, con el final de la Guerra Fría, capitalismo y comunismo (quizá fuera más apropiado decir *capitalismo corporativo* y *capitalismo de Estado*, respectivamente) se han entendido bastante bien: ahí está China, país comunista, fabricando la inmensa mayoría de los productos que se consumen en el mundo capitalista. Como el capitalismo, el comunismo es un sistema *extractivista* (basado en la extracción de los recursos naturales de la Tierra) y, por tanto, la llegada del *peak oil* y del pico del resto de las materias energéticas —el petrocalipsis al que nos hemos referido, en suma— supone para el comunismo el mismo peligro existencial que para el capitalismo.

Durante los últimos años, estamos asistiendo a un proceso de «negociación» entre el capitalismo y los límites biofísicos del planeta. Por

una parte, están los problemas evidentes para todo el mundo: la crisis ambiental y, en particular, el cambio climático. Por otra, los problemas escondidos o minimizados, pero que imponen limitaciones severas desde ya mismo: la crisis de los recursos. Pero no se puede hablar abiertamente del problema de los recursos porque su consecuencia inevitable sería asumir que tenemos que decrecer y, si la gente lo supiera, no aceptaría según qué sacrificios y llegarían a exigir un mejor reparto de la carga. Así que, de momento, se está procurando disimular el problema de los recursos e intentando cubrirlo todo dentro de la lucha contra los problemas ambientales, en la que todos nos deberemos implicar.

Por ejemplo, debido a la escasez de petróleo crudo de calidad, la producción de diésel ha comenzado ya a disminuir. Esto era de esperar: es más fácil producir gasolina (un hidrocarburo más sencillo) que diésel (que es algo más complejo). De ahí que el descenso del diésel se note antes que el del petróleo en general y que el de la gasolina en particular. Desde 2015, la producción mundial de diésel se halla en ligero retroceso, y cayó ya un 5% a finales de 2019 y la producción de todos los otros gasóleos está en caída desde 2007, con un descenso que roza ya el 30%. Se hace necesario, por tanto, tomar medidas rápidas para disminuir el consumo de diésel mientras se buscan alternativas a su uso, en caso de ser eso posible, porque, además, el descenso se va a acelerar en los próximos años. El problema es que el transporte mundial depende del diésel, destinado a los camiones y furgonetas, y mucha maquinaria pesada funciona con diésel. El diésel, lo hemos dicho ya, es la verdadera sangre de nuestra civilización.

Podríamos salir a la calle y explicar el problema real. Y, una vez debatido el asunto, llegaríamos a la conclusión de que hace falta adaptarnos a un entorno de decrecimiento forzado y comenzaríamos a hablar de cómo crear una nueva sociedad que pueda generar empleo y bienestar sin necesidad de crecimiento.

Pero eso es inaceptable para los poderes económicos. Así que, en vez de eso, se escoge otra estrategia.

Se comienza a decir que los coches de diésel son muy contaminantes, que emiten muchas partículas y gases irritantes, que son malos para la salud. Lo cual es cierto, lo que pasa es que no es nuevo: hace ya más de cuarenta años que se sabe eso. Encima, los motores de los coches actuales son muchísimo menos contaminantes que los de entonces. Y, además, toda esa

contaminación es mucho mayor cuanto más pesado es el vehículo y, en particular, en el caso de los camiones: estos y las furgonetas representan en España cinco veces más emisiones nocivas que los coches de diésel. Pero nadie habla de sustituir los camiones, porque justamente eso es lo que no se quiere tocar. Por no reconocer que el verdadero problema consiste en la escasez de diésel, se disfraza el asunto de un discurso ambiental que hace aguas por todos los lados. Total, ¿para qué? ¿Para ganar cinco años? Pero el capitalismo es cortoplacista, y cinco años ya le bastan, con la esperanza de que en ese tiempo aparezca alguna alternativa técnica, mágica, que resuelva el futuro inmediato.

Algo semejante pasa con el intento de imponer el *capitalismo verde* de hace una década, idea rescatada y puesta al día ahora con el llamado *green new deal*. Lo que se pretende con ello es que se pueda sustituir el actual consumo de combustibles fósiles por energía renovable, sin modificar para nada el resto de la estructura económica, productiva y social. Es una idea muchas veces repetida y que no pocas asociaciones ecologistas han hecho suya, hasta el punto de convertirla en su apuesta central. Pero ya hemos comentado que las energías renovables orientadas a la producción de electricidad en modo alguno podrán sustituir a los combustibles fósiles y, además, no se resolvería nada en el fondo porque el problema real es la insostenibilidad consustancial al crecimiento. Aun así, hay muchos ecologistas de buena fe que defienden la adopción de medidas de fomento de las instalaciones renovables o la instalación de puntos de recarga para coches eléctricos porque, como mínimo, se estarán dando pasos en la buena dirección. La realidad es que esas medidas no se dirigen a resolver los problemas reales y suponen, encima, un malgasto de recursos, cuando estos van a ser cada vez más escasos: ¿qué sentido tiene instalar en España mayor capacidad de generación eléctrica cuando con 108 GW de potencia el país está más que saturado? De hecho, se podrían cerrar las actuales centrales nucleares sin problemas. ¿Es correcto dar subvenciones a instalaciones domésticas e incentivos al coche eléctrico cuando quienes podrán aprovechar esas ventajas en mayor medida son las personas de rentas más elevadas? ¿Solucionamos en modo alguno los problemas estructurales que tenemos o nos ayuda en algo ante el descenso energético y la crisis ambiental?

Reconozcámoslo: no hay margen para la negociación. No hay nada que se pueda hacer dentro del capitalismo. Mientras no abandonemos este sistema, esta crisis no acabará nunca.

21POR QUÉ LA CRISIS DE LA COVID-19 HA ACELERADO NUESTRO DESCENSO

Cuando tan solo faltaban unas pocas semanas para el lanzamiento de este libro, un evento inesperado cambió nuestras vidas para siempre: la llegada de la pandemia de la covid-19. He estado a punto de escribir «completamente inesperado», pero no es cierto: desde hace años hemos bordeado la irrupción de una pandemia global con un gran impacto en nuestra sociedad y en nuestra economía, desde la gripe A hasta el MERS, pasando por el SARS y algunos brotes de ébola. Como nos avisaban los expertos, era solo cuestión de tiempo que apareciera un nuevo virus muy contagioso y que pudiera pasar inadvertido en muchos portadores para que se originase una crisis como la que azota al mundo en 2020.

Dado que la covid-19 es una enfermedad nueva, es difícil saber qué rumbo tomará durante los próximos años la crisis sanitaria que ha suscitado. Es posible que se produzcan varios brotes, aunque en las próximas ocasiones no nos encontrará con la guardia baja y probablemente su expansión se controlará desde el primer momento. Lo que está claro es que las drásticas medidas que se han tomado para la contención de la pandemia han ocasionado un daño económico inaudito en tiempo de paz: las primeras estimaciones sobre el posible retroceso del PIB en los principales países occidentales muestran caídas que no se habían visto desde la Segunda Guerra Mundial. El confinamiento obligatorio de la población durante semanas y la detención de las actividades no esenciales ha hecho caer en picado y de manera inmediata la demanda de todo tipo de bienes y servicios, y todo apunta a que no es un fenómeno pasajero.

Cuando escribo estas líneas (mayo de 2020) hay aún mucha incertidumbre sobre cómo se va a recuperar la actividad económica, pero todo indica que 2020 será un año perdido para muchos sectores. El turismo mundial se va a ver gravemente afectado: primero, por las restricciones de movimientos; segundo, porque el parón económico está acabando con los ahorros de muchas familias y, por tanto, no tendrán dinero para irse de

vacaciones; y tercero, por el miedo, pues mucha gente preferirá no viajar para no arriesgarse a contagiarse y ser hospitalizada en un país extranjero. La necesidad de evitar aglomeraciones, que se va a mantener durante muchos meses, reducirá muchísimo el comercio en general y otras muchas actividades (eventos deportivos y culturales, cine, teatro, congresos, ferias, etcétera), hasta el punto de que muchas de ellas dejarán de ser viables. El consumo de todo tipo de bienes se verá enormemente reducido, y no solo durante 2020, sino previsiblemente durante 2021 y quizá más; y como consecuencia también descenderá la demanda de materias primas y energía de la cual estos se nutrían.

Centrándonos en el caso del petróleo, de acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía en abril de 2020, la demanda mundial de petróleo cayó en más de veintiocho millones de barriles diarios con respecto al mismo mes del año anterior, es decir, una caída de aproximadamente el 30%. Para hacernos una idea de lo que representa, hay que decir que en lo peor de la crisis económica de 2008 la demanda de petróleo cayó un 4%. Semejante contracción de la demanda ha causado una fuerte caída del precio del barril, que de cotizarse en torno a los cincuenta dólares a principios de 2020 ha bajado hasta los veinte dólares y en ocasiones menos; además, en los Estados Unidos algunos contratos a futuro (contratos en los que se acuerda una compra en un plazo fijado a un precio determinado) llegaron a venderse a precios negativos: esos contratos estaban a punto de expirar y los especuladores que los acaparaban no tenían medios para almacenar ese petróleo sobrante, así que se los sacaron de encima como pudieron pagando a distribuidores reales de petróleo para que se quedaran con ellos. Y lo peor es que la demanda de petróleo se va a mantener baja durante muchos meses más.

Puede parecer paradójico que diga que es malo que la demanda de petróleo haya caído tanto, después de todo lo que he explicado sobre la escasez próxima de petróleo y de los problemas ambientales que causa su consumo. Y, sin embargo, es cierto: los cambios repentinos no son buenos, ya que pueden desestabilizar sistemas que se mantenían en una situación de equilibrio precario. Esta es justamente la situación del sector petrolero mundial.

En primer lugar, la producción de petróleo de muchos pozos no se puede detener sin más, so pena de sufrir graves consecuencias. Los yacimientos

más maduros necesitan que se mantenga una presión constante, ya que de otro modo la roca se va cementando, y se cierran las oquedades y los intersticios por los que circula el petróleo. Sin una inyección constante de fluido a presión y un cierto movimiento extractivo, esos reservorios no podrían producir tan rápido cuando todo volviera a la situación anterior; peor aún, una parte del petróleo que podría haber sido extraído sería ya irrecuperable al haberse cerrado los canales por donde fluía. En otros reservorios, el problema es que la falta de extracción favorece la migración interna de trozos de roca y de agua hacia las zonas más porosas, que son precisamente las más productivas del yacimiento. El problema del desplazamiento del agua es especialmente grave, porque el petróleo flota sobre ella y, si el agua ocupa toda una zona de extracción, el petróleo podría no volver a fluir de allí nunca más, sobre todo si esas aguas subterráneas son alimentadas por cursos de agua importantes. Añádanse a todo esto otros fenómenos, como la formación de emulsiones, la separación del agua que lubrica la roca dejándola al descubierto y dificultando el flujo del petróleo, la corrosión acentuada de las conducciones si el petróleo no se mueve, la acumulación de limos, la degradación de válvulas y un largo etcétera de otros problemas, todos ellos tendentes a reducir tanto la velocidad de extracción futura como la cantidad que finalmente se podrá extraer. El actual parón en la producción, de prolongarse unos pocos meses, nos hará perder de manera irrecuperable entre el 10 y el 15% de la producción actual. Pero eso no es, ni de lejos, el peor de los problemas.

La creciente falta de rentabilidad de los yacimientos de petróleo, fenómeno en auge desde comienzos del siglo XXI, ha producido en los últimos años un drástico descenso de inversión en exploración y desarrollo de nuevos yacimientos por parte de las compañías petroleras. La caída de inversión es tan importante desde 2014 que garantizaba una caída de producción de todos los líquidos del petróleo en los próximos años. La Agencia Internacional de la Energía asegura que podría llegar a ser del 35% de la producción en 2025, y que sería «solo» el 13% si se acometían inversiones agresivas y particularmente en los Estados Unidos, que debería multiplicar por tres su actual producción de petróleo ligero de roca compacta extraído mediante *fracking*. Sin embargo, y como ya comentamos, el *fracking* nunca ha sido rentable y, si se ha mantenido, ha sido por razones políticas, gracias a exenciones y subsidios, sobre todo

durante la Administración Trump. Pero el actual hundimiento de los precios del petróleo le está dando la puntilla al sector: los bancos norteamericanos ya se están preparando para embargar los bienes de las empresas de *fracking*, y durante los meses de marzo y abril ya hemos visto algunas quiebras importantes. Lo cierto es que el *fracking* no va a sobrevivir a la actual crisis: recordemos que las primeras explotaciones datan de 2010 y en estos diez años no han dado nunca beneficios; la paciencia de los inversores se ha agotado y ahora ya no piensan en conseguir beneficios, sino en minimizar pérdidas.

Si lo combinamos todo, tenemos que la caída del 35% en la producción de petróleo hacia 2025 en el peor escenario y que anticipaba la Agencia Internacional de la Energía va a ser peor aún, porque no solo no habrá las inversiones agresivas para que no caiga tanto, sino que, además, el *fracking* va a ser borrado del mapa, lo que añadirá otro 5% más de bajón. Con mayor probabilidad ahora, todo apunta a que en 2025 la producción de petróleo podría ser hasta un 40% inferior a lo que es en el momento presente.

Fíjense en la enorme diferencia entre que la demanda caiga un 30% (lo que ha pasado esta primavera) y que sea la producción la que caiga algo más, un 40%. En el primer caso, el parón económico hunde la demanda y, por tanto, el precio de todo, particularmente del petróleo, y los productores cesan de producir. Pero hacia 2025 el problema no sería que no se demande petróleo, sino que *no habrá* petróleo. Concretamente, faltará ese 40% de producción que, simplemente, no se podrá poner ahí si no median inversiones (en esencia a fondo perdido, porque los yacimientos son poco rentables) de miles de millones de dólares. Inversiones que las compañías ya no quieren hacer, porque no quieren seguir perdiendo dinero, y que solo los Estados pueden asumir. Pero la gran diferencia entre las dos situaciones está en el precio: en el caso de la crisis de demanda, el precio es bajo, pero en el de la crisis de oferta, el precio será alto.

La amarga tesitura a la que tendrán que enfrentarse los Estados en los próximos años es que, después de una dura crisis económica originada por la pandemia de la covid-19 (y que no sabemos cuánto durará), deberían de invertir sus presupuestos menguados debido a la falta de recaudación en apuntalar la industria petrolera, si no quieren que se derrumbe estrepitosa y aceleradamente y nos ponga en una situación aún peor. Porque si comienza

a faltar petróleo la crisis económica iniciada por la covid-19 se agravará, ya que no habrá petróleo para todo el mundo y algunos negocios más tendrán que quebrar, no por falta de demanda, sino por no poder asumir los costes aceleradamente crecientes de la energía.

Es de esperar que los Estados no sean proactivos y que, por tanto, no se anticipen a este problema (no creo que ningún ministro lea este libro, la verdad), así que reaccionarán tarde, cuando los problemas con el sector de los hidrocarburos sean graves. En los países que importan la mayoría del petróleo, como España, poca cosa se podrá hacer aparte de racionar el combustible y tomar medidas intervencionistas de la economía. En los países productores, los Estados decidirán intervenir la producción de petróleo, pero eso significará que les quedarán menos recursos para ayudar a su población y a su economía, y eso podrá llevar a una mayor inestabilidad interna y un mayor riesgo de revueltas. Y si algún productor importante se hunde en una guerra civil, la falta de petróleo se agudizará y, de nuevo, lo hará de golpe.

Todo esto era previsible que sucediera si no se tomaban medidas, pero no en 2025, sino a partir de 2030. La crisis de la covid-19 nos ha robado cinco, quizá diez años. No es que ya no haya tiempo para reaccionar, no es que no se puedan hacer muchas cosas para hacer frente a lo que se nos viene encima. Pero lo cierto es que tenemos menos tiempo para perder, porque todo se está precipitando. Más que nunca, el momento de actuar es ahora.

22QUÉ ES LO QUE REALMENTE HACE FALTA CAMBIAR

Durante todo el libro hemos visto qué es lo que está fallando y lo que va a fallar y por qué lo que se propone con vistas a resolver nuestros problemas ambientales y de recursos no va a resolver el problema de verdad. Si se han fijado bien, en el ámbito político toda la atención se centra en las cuestiones científicas y tecnológicas: cómo conseguir energía de otras fuentes, cómo hacer máquinas más eficientes, cómo sustituir los coches con motor de combustión interna por coches eléctricos, cómo usar materiales nuevos con propiedades exóticas… Hemos visto que nada de eso funciona, que todo eso son fantasías peligrosas que nos hacen cerrar los ojos ante los problemas reales que nos acechan. Y es que el problema real no es la energía, sino el capitalismo. Si ahora mismo se duplicasen las reservas de petróleo fácilmente extraíble, tardaríamos solo treinta años en agotarlas al ritmo del consumo actual y, si se diera el ritmo de crecimiento anual de consumo de petróleo de principios de siglo, esas mismas reservas se acabarían en apenas una década. No se trata ya de encontrar más recursos, porque eso solo postergaría el problema y, además, por cada vez menos tiempo. Lo que hay que hacer, llegados a este punto, es abordar otros cambios, unos de naturaleza muy diferente.

¿Qué cambios deben hacerse? Se trataría de cambios de índole social más que tecnológica, de modificar nuestra manera de relacionarnos con la Tierra. De asumir cambios profundos en nuestra manera de entender la economía. Yo no soy un experto en este ámbito, que corresponde más bien al de la economía ecológica, pero sí que les enunciaré, en lo sucesivo, algunas de las características deseables de ese nuevo sistema económico y social que necesitamos establecer para no colapsar:

- — ANULACIÓN DE LAS DEUDAS ACTUALES: en un mundo sin crecimiento y, peor aún, abocado al decrecimiento continuo, las deudas se vuelven impagables y pueden condenar a personas y a países enteros a la esclavitud. Esa no es la mejor manera de comenzar una transición, y, si aceptamos que esas deudas se basan en una injusticia (la errónea

valoración de los recursos naturales), lo lógico sería que hubiera un gran jubileo de la deuda. El mundo está cambiando, se transforma a marchas forzadas, y las reglas que lo definen también han de cambiar. No se puede comenzar con una pesada losa encima difícil de sobrellevar.

- — REFORMA RADICAL DEL SISTEMA FINANCIERO: no se puede esperar seguir cobrando intereses por el préstamo del dinero. Si el sector financiero es crítico para el buen funcionamiento de la sociedad (y lo será durante el período de transición), no puede confiarse a él la gestión privada (que tiende a privatizar las ganancias y a socializar unas pérdidas que, a partir de ahora, serán crecientes e inevitables) ni tampoco esperar una gestión de la economía orientada al crecimiento.

- — REDEFINICIÓN DEL DINERO: la política monetaria no puede ser expansiva y en un primer momento será más bien contractiva. El dinero es una representación del valor, no el valor en sí mismo, y su gestión tiene que ser controlada por los sectores directamente involucrados: fabricantes, comerciantes, consumidores… La gente tenderá a usar divisas locales antes que la divisa nacional por la mayor dificultad de garantizar el valor de esta última en una sociedad que colapsa. Las divisas locales no pueden estar controladas por intereses especulativos foráneos y, por tanto, no se puede permitir que se atesore o capitalice (el análisis económico clásico nos dirá que, de este modo, se pierden oportunidades de inversión y de crecimiento).

- — REFORMA DE LOS ESTADOS: desde su nacimiento, los Estados y el capitalismo han compartido objetivos y se han complementado con gran eficacia social hace décadas en algunos países (el Estado del bienestar es un buen ejemplo), pero, inevitablemente, el Estado nación ha entrado también en crisis al dejar de ser viable el capitalismo. Es necesario, pues, relocalizar los centros de decisión y acercar la gestión a los administrados, pero de verdad, no de boquilla. La gestión ha de ser municipal antes que comarcal, comarcal antes que regional, regional antes que nacional. La falta de energía llevará a una lógica de relocalización que tenderá de forma gradual a hacer los ámbitos administrativos cada vez más locales, pero, durante la transición, la

ineficiencia de un poder administrativo nacional hipertrofiado puede interponer demasiadas trabas, sobre todo de tipo legal.

- — DEFINICIÓN DE PLANES DE TRANSICIÓN LOCALES: cada población tiene que determinar cuáles son sus mayores problemas e invertir recursos en controlarlos. En algunas comunidades, faltará el agua; en otras, el problema será la falta de suelo fértil; en unas terceras, el exceso de población, la contaminación o la escasez de recursos fundamentales… Se ha de analizar cuidadosamente la situación y comprender que no viviremos una continuidad del sistema actual, sino, por el contrario, un cambio radical. Una vez identificados los puntos sensibles, se han de invertir recursos y esfuerzos en moldearlos para posibilitar la transición, y eso aun cuando —desde la perspectiva capitalista actual — tal inversión no resulte rentable. Este será uno de los grandes obstáculos, aunque de alcance bastante menor que la cancelación de deudas o del interés compuesto.

- — PRESERVACIÓN DE LOS SERVICIOS BÁSICOS:justamente esta será una de las mayores dificultades de la transición: a la oposición del capital a perder sus privilegios se le unirá la dificultad que supone mantener un flujo de recursos suficiente para permitirse ciertos derechos adquiridos. Según el grado de escasez al que se vea sometida cada localidad, se podrán mantener mayores o menores servicios. Los más fundamentales son: la educación, la sanidad y la asistencia a la gente mayor y necesitada. Para poder conservar estos servicios fundamentales, cada localidad deberá decidir qué sistema de financiación prefiere emplear: si uno basado en impuestos o en el trabajo voluntario de los ciudadanos. Poder ofrecer más servicios dependerá de la riqueza relativa de cada lugar.

Ninguna de estas medidas habla de forma explícita de energía, sino *de organización social*. Sin embargo, todas ellas tienen implicaciones de largo alcance sobre el uso y la disponibilidad de la energía utilizable. De hecho, son las medidas que mayor impacto energético cosecharían, mucho más que las modestas medidas de ahorro y eficiencia que se proponen habitualmente. En suma, las medidas arriba esbozadas son las únicas que resultan imprescindibles en una situación de descenso energético.

Se pueden tomar, asimismo, *medidas técnicas*concretas que ayudarían a encarrilar correctamente la transición. Estas medidas en modo alguno sustituyen a las *medidas sociales* o de organización social enunciadas más arriba y solo tienen sentido como una ayuda para poder llevarlas a cabo. Lo que resulta bastante interesante es que, a pesar su carácter técnico y tecnológico, tampoco se parezcan demasiado a las que se están proponiendo en la actualidad para hacer frente a la emergencia climática. Enunciémoslas:

- — REINGENIERÍA: se tiene que revisar la ingeniería de todo, a saber: de los productos, de los procesos de fabricación, de la elaboración de las máquinas que se utilizan para ellos, de la distribución de los productos, de la gestión de los residuos tanto en el ambiente industrial como urbano, etcétera. Todo ello deberá ser repensado de nuevo porque el criterio que se había favorecido hasta ahora era el económico, el cual se basaba en la hipótesis de que los combustibles fósiles serían siempre baratos y abundantes y que no tenía importancia si se usaban materiales escasos, difíciles de reciclar o que, una vez agotada su vida útil, generaran recursos tóxicos. Todo eso tiene que cambiar, porque los procesos actuales no solo nos perjudican de cara al futuro inmediato, sino que incluso se están volviendo antieconómicos, aunque se sigan haciendo por inercia y con la bendita esperanza de que las actuales circunstancias sean solo coyunturales. Así pues, cuanto antes se haga este cambio, tanto mejor. Hay que modificar los diseños para favorecer, en primer término, el ahorro de materiales (usar los mínimos imprescindibles y tan pocos recursos no renovables como se pueda). En segundo término, su reutilización (que, cuando un dispositivo acabe su vida útil, las partes aprovechables se puedan usar en otros dispositivos, aunque eso conlleve dispositivos más grandes, aparatosos y de menores prestaciones) y solamente en último término el reciclaje.

- — APRENDIENDO A APROVECHAR LA ENERGÍA RENOVABLE: los actuales planes de aprovechamiento de la energía renovable están centrados en la producción de electricidad, lo cual es un gran desperdicio de energía: en primer lugar, porque, debido al segundo principio de la termodinámica, al convertir la energía mecánica del viento y del agua o la energía solar en electricidad, se disipa mucha energía, ya que se trata de tipos de energía muy diferentes. Y, en segundo lugar, porque la

electricidad debe generarse para estar disponible el cien por cien del tiempo, cuando cualquier usuario la solicite, y eso supone un sobreesfuerzo y una pérdida adicional de energía. La realidad es que podríamos aprovechar mucho mejor la energía renovable si no la convirtiéramos siempre en electricidad, sino en tipos de energía más cercana y con mejor rendimiento. Así, por ejemplo, la energía mecánica lineal de vientos y cursos de agua se puede convertir en energía mecánica circular a través de las aspas, y esa energía usarse directamente, como se hacía antaño (no solo para moler el grano, sino también para trabajar el metal y para mover materiales). Por otro lado, la energía del sol se aprovecha mejor térmicamente, usándola para calentar ya sea agua sanitaria, ya, concentrándola, para producir vapor de agua o incluso fundir metales. Estas maneras más directas de aprovechamiento de la energía renovable obtienen rendimientos de entre el 80 y el 90 % frente al 15 o 20 % de los sistemas orientados a la producción de electricidad, pero presentan dos inconvenientes desde una lógica capitalista: el aprovechamiento de la energía es local y se han de seguir los ritmos de la naturaleza. De ahí que en los planes actuales se prime la producción de electricidad, a pesar de ser mucho peor desde la perspectiva del rendimiento, ya que, si la energía renovable fuera ilimitada, su uso eléctrico permitiría el crecimiento indefinido de la producción (pues la electricidad se comparte rápidamente y de forma deslocalizada). Sabiendo como sabemos que el potencial renovable no es infinito y que la idea del crecimiento indefinido es equivocada, se debería apostar por la *producción energética renovable no eléctrica* —un terreno que aún está muy poco explorado en nuestro tiempo y en el que la ingeniería también tiene mucho que decir—.

- — CAMBIO DE LOS MODELOS DE PROPIEDAD: hoy en día, la producción está completamente orientada a la posesión del objeto fabricado. Pero, como el sistema económico necesita del crecimiento, se precisa una cantidad creciente de objetos producidos, y para ello acaban introduciéndose prácticas como las modas, la obsolescencia percibida o la obsolescencia programada, las cuales buscan que el ciclo de vida de los productos sea corto y resulten rápidamente reemplazados por nuevos objetos, lo que aumenta el desperdicio de recursos y el impacto

ambiental. Esto, además, favorece el uso indiscriminado de la publicidad para fomentar ese consumo incesante, una publicidad que genera efectos indeseables, tales como pervertir las relaciones humanas (de modo que muchas personas solo encuentren satisfacción a sus frustraciones a través de un consumo compulsivo). O la perversa contabilidad fruto de las externalidades, que acaba poniendo precio a la contaminación e incluso a las vidas humanas. Una manera de combatir todos estos problemas consiste en acabar con la propiedad privada de todo lo que no sea un bien de consumo inmediato o personal, por ejemplo, de una lavadora. Así pues, en vez de vender una lavadora, el fabricante vendería el derecho a usar el servicio de una lavadora en su domicilio. El cliente pagaría un tanto al mes por usarla y, en el momento en que la lavadora no funcionase, el fabricante tendría un tiempo razonable para repararla o reemplazarla, transcurrido el cual debería pagarle al cliente una indemnización por incumplimiento del servicio. De ese modo, el fabricante tendría todos los incentivos para hacer diseños de lavadoras muy robustos y fáciles de reparar. Además, una parte de la fábrica estaría orientada a la reparación y no solo a la producción. Se acabaría de golpe la obsolescencia programada y la publicidad perdería mayoritariamente su sentido actual.

- — CAMBIO DEL MODELO DE USO: no solo el modelo de propiedad debería modificarse, también el concepto mismo de uso. El planeta seguramente no dispone de recursos suficientes para que cada familia tenga una lavadora o una nevera, pero probablemente tampoco sea necesario. Este tipo de electrodomésticos y demás objetos podrían compartirse entre muchas familias. Por ejemplo, entre todas las que vivieran en el mismo bloque. De hecho, de manera natural ya se está tendiendo a ello (las lavanderías que se generalizan progresivamente en España y que son muy comunes en toda Europa o el concepto mismo del *car sharing*). Supone una manera de reducir el consumo total al asumir que muchos objetos podrían tener muchos usuarios ya que nadie los necesita todo el rato.

- — MINERÍA DE LOS VERTEDEROS Y REAPROVECHAMIENTO DE MATERIALES: hacer la transición va a requerir el uso de muchos materiales. Quizá, cuando nuestra técnica progrese lo suficiente,

podamos sintetizar muchos materiales útiles usando solamente materias primas abundantes y fáciles de reciclar, pero mientras tanto podemos y debemos aprovechar la gran abundancia de materiales procesados de alta calidad generados por la sociedad industrial, muchos de los cuales se han arrojado a los vertederos sin pensarlo demasiado. Tenemos grandes cantidades de aleaciones de gran calidad que podemos aprovechar, así que necesitamos plantearnos seriamente explotar nuestros vertederos como una fuente próxima, de calidad y fácilmente accesible, para muchos materiales. Asimismo, existen multitud de objetos cotidianos que, en un futuro nada lejano, no serán útiles, pero que contienen materiales de alta calidad (por ejemplo, las señales de tráfico o los semáforos). Habría que planificar correctamente el desmantelamiento de todo lo inútil para sacarle el máximo provecho pensando en una época por venir en que los materiales de minería no serán abundantes.

- Se podrían proponer muchas otras cosas, pero la relación de medidas económico-sociales y técnicas que planteo más arriba figura entre las que se requieren para poder llevar a cabo la transición prevista que realmente necesitamos. De momento, por supuesto, nadie está mencionando nada que se le parezca. Y es que implementar estas medidas supone aceptar que hace falta abandonar el capitalismo, algo por ahora impensable desde nuestros ámbitos políticos. La mera idea de que el capitalismo esté condenado y que vaya a terminar, tanto si queremos como si no, se vive prácticamente como un tabú social hoy en día. Mucha gente concibe antes el fin del mundo que el fin del capitalismo, y no son pocos los que identifican ambas cosas. De ahí las frecuentes películas de catástrofes planetarias o posapocalípticas tipo *Mad Max*: según estas, existe una vaga percepción en la sociedad de que nos encaminamos hacia el fin del capitalismo, pero dentro del paradigma cultural dominante el fin del capitalismo solo puede suceder en un contexto de fin del mundo.

Y, sin embargo, el capitalismo no tiene ni dos siglos de existencia. El capitalismo ha sido un sistema económico que ha conseguido generar un progreso acelerado de la ciencia y de la técnica y mejorar de manera extraordinaria las condiciones de vida de (una parte de) los habitantes de la

Tierra. Pero también ha supuesto multitud de contradicciones, y actualmente su mayor contradicción es que es un sistema orientado al crecimiento en un planeta finito, y del cual estamos percibiendo ya sus límites biofísicos. El capitalismo equivale a algo así como la infancia y la adolescencia de la humanidad: un período en el que hemos crecido y nos hemos desarrollado muy deprisa y bajo el cual nos creíamos invencibles. Pero no, ya no podemos seguir por la misma senda: tenemos que madurar, llegar a un estado estacionario de «no más crecimiento», tenemos que volvernos adultos. Ese es nuestro gran reto: *madurar*.

23POR QUÉ SÍ

Acaso al lector le parezca que, después de tantos capítulos diciendo «por qué no» es posible tal o cual cosa, al final el autor habría sucumbido al mismo pensamiento positivo del que hablábamos en el prólogo.

En realidad, si hemos tenido que invertir tantas páginas para comentar cosas tan diferentes, ha sido solo para explicar una muy sencilla: no existe solución al problema porque estamos intentando resolver el problema equivocado. Como en el chiste, insistimos en buscar debajo de la farola las llaves que perdimos en un rincón oscuro simplemente porque es la parte de la calle donde hay luz.

En la discusión política actual, todo el acento se pone en la ciencia y en la técnica. Según parece, hay que investigar más en fuentes de energía alternativas, sobre todo en las renovables, y tenemos que conseguir que todos los dispositivos usen la energía de manera más eficiente, aparte de que se consuman menos materiales en su fabricación y se produzcan menos residuos en toda su vida útil. En las diversas leyes y disposiciones previstas para la transición ecológica, se fijan objetivos a largo plazo sobre cómo debería ser la eficiencia de los procesos industriales, cuáles serían las reducciones aconsejables para las emisiones de CO_2 y cuál el porcentaje de consumo de energía renovable… Se pretende regular de manera legislativa lo que, en la mayoría de los casos, depende de leyes y principios de la física, como ocurre, por ejemplo, con los principios de la termodinámica. Aspiramos a establecer a golpe de decreto ley cómo se van a hacer las cosas, aunque lo que se pretenda en realidad sea físicamente imposible.

Todo el énfasis se pone en aspectos técnicos y tecnológicos y en el desarrollo científico, porque no se quiere mirar el principal, el verdadero problema planteado. Y es que no tiene sentido intentar preservar un sistema económico basado en el crecimiento infinito (y encima acelerado) en un planeta finito, y menos todavía cuando se multiplican los signos que nos muestran que ya hemos alcanzado diversos límites planetarios, habida cuenta de que, si los seguimos ignorando, podríamos acabar por autodestruirnos.

Si me lo permiten, por un momento hablaré en representación de mis colegas científicos y tecnólogos, sabiendo como sé que mi opinión no representa forzosamente la de todos ellos, aunque crea que la mayoría estaría de acuerdo con lo que voy a decir a continuación.

Dejen de pedirnos a nosotros la solución a todos estos problemas. Estamos planteando un problema sin solución: el de crecer indefinidamente en un planeta finito. No tiene sentido, y da igual cuántas cosas podamos descubrir, nunca serán suficientes para intentar cubrir ese imposible. La solución que necesitamos no es científica ni tecnológica: tan solo social. Simplemente, precisamos de un nuevo sistema económico y social que no necesite forzosamente el crecimiento.

No digo que la investigación científica y el desarrollo tecnológico sean inútiles; es más, estoy seguro de que aportarán muchas más cosas útiles a la humanidad. Pero no nos carguen a nosotros con la ingente tarea de resolver un imposible. No pidan cosas que son físicamente irrealizables esperando que algún día el progreso científico-técnico solvente unas contradicciones generadas por un grave error de concepción y enfoque social.

Hay gente que, cuando por fin entiende esto, cuando por fin comprende que no hay ningún problema técnico que resolver, sino que todo el problema es —pura y llanamente— de organización social, sucumbe de pronto al desánimo. Estas personas consideran mucho más difícil cambiar la manera de organizarnos y de entendernos entre nosotros que intentar crear una especie de reactor nuclear mágico que proporcione una cantidad de energía infinita, aunque al final eso suponga freír toda la vida del planeta. Prefieren intentar resolver un problema imposible antes que enfrentarse al capitalismo.

Y, sin embargo, el problema real que tenemos es mucho más fácil de resolver de lo que pensamos. Es cierto: *más fácil* no significa en absoluto que vaya a ser fácil. Los poderes económicos se van a tirar encima de quien ose plantear el abandono del capitalismo y la implementación de medidas semejantes, no digamos ya si son más osadas que las abordadas en el capítulo anterior. Los medios de comunicación, al servicio de esos grandes poderes económicos, utilizarán todo tipo de epítetos grandilocuentes para descalificar cualquier propuesta de abandono del capitalismo. Una parte del sector académico, más o menos abiertamente al servicio de los intereses económicos, descalificará toda propuesta que se haga y exagerará la

importancia de ciertas deficiencias técnicas que se observen y minusvalorará los aciertos. Y la mayoría de los partidos políticos atacarán sin piedad lo que calificarán de meras ocurrencias, un ataque al Estado del bienestar o, incluso, un atentado contra nuestros derechos más básicos. Todo eso es cierto. Y, a pesar de ello, da igual.

Da exactamente igual porque no hay alternativa.

Aunque durante algunos años aún pueda parecer que una determinada solución (basada en las energías renovables, en la nuclear, en los biocombustibles o en lo que sea) vaya a permitir mantener el sistema capitalista, no es verdad. Pasarán los años y las alternativas fracasarán. Lo harán de manera silenciosa: no se dirá que han fracasado, pero lo cierto es que no resolverán ninguno de los problemas planteados que se decía que iban a resolver.

Pasará el tiempo y la situación de la mayoría de la gente será cada vez más complicada, sin que ninguna tecnología mágica acuda a su rescate. Se sucederán los gobiernos, algunos de ellos autoritarios, otros belicosos… Pero ni la represión interna ni las guerras externas resolverán el problema.

Al final, poco a poco, la gente se irá dando cuenta de que ideas semejantes a las que se proponen en este libro son las que funcionan. Porque, además, son ideas que se pueden implementar a escala local: no hacen falta grandes programas de implantación nacional. Se empezarán a probar y se verán resultados concretos. A medida que el capitalismo se vaya desmoronando, irá asomando una realidad alternativa.

Eso no quiere decir que nos podamos sentar tranquilamente en nuestro sillón a esperar a que el capitalismo desaparezca, ahogándose en sus propias contradicciones. Porque, si bien el capitalismo acabará desapareciendo (o mutando radicalmente desde lo que es ahora), aquello hacia lo que nos encaminamos dependerá de las medidas que tomemos nosotros *aquí y ahora*. Así pues, podemos acabar en un sistema ecofascista, en el que un Estado imponga a sus ciudadanos medidas coercitivas que ciertamente sean positivas desde el punto de vista de la crisis de recursos y del medioambiente, pero sus métodos serán autoritarios y represivos, y no necesariamente se repartirá la carga de una manera equitativa. O bien podemos acabar en un sistema militarista y expansionista, convencido de que la solución a la crisis consiste en invadir tantos países como pueda en pos de los recursos que se necesitan para mantener el *statu quo*. Y, claro,

podemos acabar en un sistema neofeudal, en el que uno o varios señores de la guerra impongan su ley a sangre y fuego a toda la población. Pero también podemos acabar en un sistema democrático, capaz de gestionar los límites y, al mismo tiempo, de respetar las libertades individuales y colectivas, además de fraguar consensos amplios siendo respetuoso con las posiciones minoritarias. Cualquiera de esos sistemas es posible, y seguramente en el mundo de mañana convivan todos ellos. El tipo concreto al que nosotros vamos a pertenecer dependerá completamente de nosotros mismos.

Por eso ahora le digo al lector: «por qué sí». Por qué, en efecto, sí que podemos construir un futuro que sea esperanzador y compartido. Porque siempre hemos podido. Solo hacía falta que creyéramos en ello. El futuro está en nuestras manos.

BIBLIOGRAFÍA

PARA SABER MÁS

Bibliografía básica seleccionada, con la colaboración del Instituto Español de Resiliencia (<**http://www.instituto-resiliencia.org**>).

LIBROS EN CASTELLANO

- Asociación Véspera de Nada por unha Galiza sen Petróleo (2019), *Guía para el descenso energético. Preparando un futuro después del petróleo*, Málaga: Ediciones del Genal.
- BARDI, Ugo (2014), *Los límites del crecimiento retomados*, Madrid: La Catarata.
- BERMEJO, Roberto (2008), *Un futuro sin petróleo. Colapsos y transformaciones socioeconómicas*, Madrid: Los Libros de la Catarata.
- CASAL LODEIRO, Manuel (2016), *La izquierda ante el colapso de la civilización industrial. Apuntes para un debate urgente*, Madrid: La Oveja Roja.
- CUCARELLA, Vicent (2019), *Economía para un futuro sostenible. Claves para entender la economía de nuestro tiempo*, Alcira: Algar Editorial.
- CUESTA, José Alberto (2019), *Decrecer para sobrevivir*, Barcelona: El Viejo Topo.
- FERNÁNDEZ DURÁN, Ramón, y GONZÁLEZ REYES, Luis (2014), *En la espiral de la energía*, Valencia: Libros en Acción/Baladre.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas (1996), *La Ley de la Entropía y el proceso económico*, Madrid: Fundación Argentaria.
- HEINBERG, Richard (2014), *El final del crecimiento*, Barcelona: El Viejo Topo.

- HERRERO, Yayo; RIECHMANN, Jorge, y SANTIAGOMUÍÑO, Emilio (2018), *Petróleo*, Barcelona: Arcadia/MACBA.
- LATOUCHE, Serge (2008), *La apuesta por el decrecimiento. ¿Cómo salir del imaginario dominante?*, Barcelona: Icaria.
- MEADOWS, Donella; RANDERS, Jorgen, y MEADOWS, Dennis (2004), *Los límites del crecimiento. 30 años después*, Barcelona: Círculo de Lectores/Galaxia Gutenberg.
- RIECHMANN, Jorge (2006), *Biomímesis. Ensayos sobre imitación de la naturaleza, ecosocialismo y autocontención*, Madrid: Los Libros de la Catarata.
- RIECHMANN, Jorge; CARPINTERO, Óscar, y MATARÁN, Alberto (comps.) (2014), *Los inciertos pasos desde aquí hasta allá: alternativas socioecológicas y transiciones poscapitalistas*, Granada: Universidad de Granada.
- SANTIAGO MUÍÑO, Emilio (2016), *Rutas sin mapa. Horizontes de transición ecosocial*, Madrid: Los Libros de la Catarata.
- — (2017), *Opción cero. El reverdecimiento forzoso de la Revolución cubana*, Madrid: Los Libros de la Catarata/FUHEM Ecosocial.
- SEMPERE, Joaquim (2018), *Las cenizas de Prometeo. Transición energética y socialismo*, Barcelona: Ediciones de Pasado y Presente.
- SOLÉ, Jordi, y SARDÁ, Francesc (2015), *Por qué la crisis no acabará nunca*, Barcelona: Laertes.
- TAIBO, Carlos (2009), *En defensa del decrecimiento. Sobre capitalismo, crisis y barbarie*, Madrid: Los Libros de la Catarata.
- — (2016), *Colapso: capitalismo terminal, transición ecosocial, ecofascismo*, Madrid: Los Libros de la Catarata.
- TRAINER, Ted (2017), *La vía de la simplicidad. Hacia un mundo sostenible y justo*, Madrid: Trotta.

SITIOS WEB

- Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN), *Crisis energética*. Disponible en: <**https://www.crisisenergetica.org**>.
- Ferran PUIG VILAR, *Usted no se lo cree*. Disponible en: <**https://ustednoselocree.com**>.
- Grupo de Emergencia Civilizatoria (EmerCiv), *Transición ecológica y emergencia civilizatoria*. Disponible en: <**http://www.transicion-ecologica.info**>.
- Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid. Disponible en: <**https://geeds.es**>.
- Grupo de Investigación Transdisciplinar sobre Transiciones Socioecológicas, *Transiciones y colapsos*. Disponible en: <**https://transecos.wordpress.com**>.
- Instituto Resiliencia, *15/15\15. Revista para una nueva civilización*. Disponible en: <**http://www.15-15-15.org**>.
- TURIEL, Antonio, *The Oil Crash*. Disponible en: <**http://crashoil.blogspot.com**>.
- *Última llamada (manifiesto)*. Disponible en: <**http://www.ultimallamada.org**>.

INFORMES Y ARTÍCULOS Y LIBROS TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS

- ACURIO VASCÓNEZ, Verónica; GIRAUD, Gaël; MCISAAC, Florent John, y PHAM, Ngoc-Sang (2014), «The Effects of Oil Price Shocks in a New-Keynesian Framework with Capital Accumulation»,*Energy Policy*, n.º 86, pp. 844-854.
- BERMEJO GÓMEZ DE SEGURA, Roberto (2009), «Sociedades en emergencia energética. La transición hacia una economía post-carbono»,*Ekonomiaz. Revista Vasca de Economía*, n.º 71, pp. 136-163.
- *BP Statistical Review of World Energy*, 2019.
- CAPELLÁN-PÉREZ, Íñigo; DE CASTRO, Carlos, y MIGUEL, Luis J. (2018), «Dynamic EROI of the global energy system in future

scenarios of transition to renewable energies». En: *3rd South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems* (SDEWES), Novi Sad (Serbia).

- De Castro, Carlos; Mediavilla, Margarita; Miguel, Luis J., y Frechoso Escudero, Fernando A. (2011), «Global wind power potential: physical and technological limits», *Energy Policy*, vol. 39, n.º 10, pp. 6.677-6.682.
- — (2013), «Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n.º 28, pp. 824-835.
- Dimitropoulos, John (2007), «Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge», *Energy Policy*, vol. 35, n.º 12, pp. 6.354-6.363.
- Dittmar, Michael (2013), «The end of cheap uranium», *Science of the Total Environment*, n.º 461-462, pp. 792-798.
- Freire-González, Jaume (2017), «Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries», *Energy Policy*, n.º 102, pp. 270-276.
- Hamilton, James (2009), «Causes and consequences of the oil shock of 2007-2008», *NBER Working Paper n.º w15002*, vol. 40, n.º 1, pp. 215-283.
- Hu, Aixue; Levis, Samuel; Meehl, Gerald A.; Han, Weiqing; Washington, Warren M.; Oleson, Keith W.; Van Ruijven, Bas J.; He, Mingqiong y Strand, Warren G. (2016), «Impact of solar panels on global climate», *Nature Climate Change*, n.º 6, pp. 290–294.
- Höök, Mikael, y Aleklett, Kjell (2010), «A review on coal-to-liquid fuels and its coal consumption», *International Journal of Energy Research*, vol. 34, n.º 10, pp. 848-864.
- Hormaeche Azumendi, José Ignacio; Pérez deLaborda Delclaux, Álvaro, y Sáenz deOrmijana Fulgencio, Txetxu (eds.) (2008), *El petróleo y la energía en la economía. Los efectos económicos del encarecimiento del petróleo en la*

economía vasca, Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

- International Energy Agency Press (2018), *World Energy Outlook 2018*, París: International Energy Agency Press.
- KIEFER, Tod A. (2013), «Twenty-first Century snake oil: Why the United States Should Reject Biofuels as Part of a Rational National Security Energy Strategy», *WICI Occasional Paper*, n.º 4.
- MAGGIO, Gaetano, y CACCIOLA, Gaetano (2012), «When will oil, natural gas, and coal peak?», *Fuel*, n.º 98, pp. 111-123.
- PRIETO, Pedro, y HALL, Charles (2013), *Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment*, Berlín: Springer.
- U. S. Government Accountability Office (2007), *Crude Oil: Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production*, Washington: U. S. Government Accountability Office.

NOTAS

*

Cuando este libro iba a ver la luz, el pasado mes de marzo, la propagación de la covid-19 lo trastocó todo. Decidimos entonces posponer su publicación al mes de septiembre. Durante estos meses, el autor ha añadido un capítulo en el que relaciona los efectos de la nueva pandemia con los problemas energéticos. El debate de fondo que esta obra plantea con rigor y crudeza es tan vigente hoy como hace seis meses, y lo seguirá siendo cada vez más. (*N. del e.*)

Le animamos a visitarnos y, si lo desea, a ponerse en contacto con nosotros en:

www.editorialalfabeto.com

¡Muchas gracias por su tiempo!

«La carne es triste…», ya lo escribió Mallarmé, pero si no has leído todos los libros de nuestro catálogo es que todavía no has leído todos los libros…